



# TREBALL FINAL DE MÀSTER



ESCOLA  
POLITÈCNICA SUPERIOR  
UNIVERSITAT DE LLEIDA  
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: **Fernando Robles López**

Titulació: Màster en Enginyeria Industrial

Títol de Treball Final de Màster: **Diseño de un difusor con CFD**

Director/a: **Albert Oriol Castell Casol**

Presentació

Mes: Juliol

Any: 2018



## Índice de índices

Índice de la memoria.....	I
Índice de figuras.....	II
Índice de ecuaciones.....	V
Índice de tablas.....	VI

## Índice de la memoria

1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo del proyecto .....	1
1.2. Alcance del proyecto.....	1
2. Difusor .....	2
3. Teoría sobre mecánica de fluidos.....	6
3.1. Ecuaciones de conservación .....	6
3.1.1. Conservación de masa.....	6
3.1.2. Conservación del momento.....	7
3.2. Números adimensionales .....	8
3.3. Fuerzas aerodinámicas: downforce y drag .....	9
3.4. Capa límite .....	14
3.4.1. Subcapa viscosa ( $y^+ < 5$ ).....	16
3.4.2. Subcapa buffer and Log-law (intermedia), ( $5 < y^+ < 500$ ) .....	16
3.4.3. Subcapa exterior ( $y^+ > 500$ ) .....	17
3.5. Desprendimiento de la capa límite.....	18
3.6. Bernoulli y efecto Venturi .....	21
4. Diseño del coche en 3D .....	23
4.1. Preparación del dominio.....	29
4.2. Diseño de los difusores a estudiar .....	31
4.2.1. Caso 1 (Difusor original) .....	31
4.2.2. Caso 2 (Aletas rectas) .....	32
4.2.3. Caso 3 (Aletas curvadas).....	33
5. CFD.....	34
5.1. Physic conditions.....	35



5.1.1.	Análisis del modelo turbulento .....	40
5.2.	Mesh conditions.....	47
5.2.1.	Grid independency .....	55
5.3.	Análisis del mallado .....	61
5.4.	Resultados.....	70
5.4.1.	Caso sin difusor.....	70
5.4.2.	Caso 1 (Difusor original) .....	78
5.4.3.	Caso 2 (Difusor aletas rectas) .....	84
5.4.4.	Caso 3 (Difusor aletas curvadas).....	91
6.	Conclusiones .....	99
7.	Planes de futuro .....	100
8.	Anexo.....	102
8.1.	Ecuaciones de transporte .....	102
9.	Bibliografía.....	106
9.1.	Aerodinámica .....	110
9.2.	SolidWorks .....	110
9.3.	Star-CCM+ .....	111

## Índice de figuras

Figura 1	Difusor con aletas de un Mercedes CLA .....	2
Figura 2	Difusor sin aletas de un Ferrari F40 .....	2
Figura 3	Diferentes diseños de difusores en la F1 .....	3
Figura 4	Doble difusor de Brawn GP.....	4
Figura 5	Efecto drag del alerón en un Formula 1 .....	4
Figura 6	Sistema de activación del DRS .....	5
Figura 7	Fuerzas que actúan en el coche.....	9
Figura 8	Área drag .....	11
Figura 9	Adhesión de la primera capa de aire .....	12
Figura 10	Área lift .....	13
Figura 11	Distribución de velocidades según el tipo de capa límite .....	14
Figura 12	Representación de la distribución de velocidades según su región de subcapa .....	15
Figura 13	Desprendimiento de la capa límite.....	19
Figura 14	Conducto basado en la ecuación de Bernoulli y el efecto Venturi.....	22
Figura 15	Parte trasera Audi R8.....	24



Figura 16 Parte frontal Audi R8 .....	24
Figura 17 Dimensiones reales del modelo a estudiar .....	25
Figura 18 Vista de los bajos del modelo .....	26
Figura 19 Modelo 3D .....	26
Figura 20 Modelo 3D vista frontal-lateral .....	27
Figura 21 Modelo 3D vista trasera-lateral.....	28
Figura 22 Modelo 3D vista de perfil .....	28
Figura 23 Modelo 3D vista de planta del suelo .....	28
Figura 24 Flujo cercano influenciado por el envolvente .....	29
Figura 25 Unión entre el dominio y el coche con las dimensiones acotadas.....	30
Figura 26 Cavidad presente en el dominio del coche .....	31
Figura 27 Difusor original .....	32
Figura 28 Vista trasera del difusor original.....	32
Figura 29 Vista en planta del difusor original .....	32
Figura 30 Difusor de aletas rectas .....	32
Figura 31 Vista trasera del difusor de aletas rectas .....	33
Figura 32 Vista en planta del difusor de aletas rectas.....	33
Figura 33 Difusor de aletas curvadas.....	33
Figura 34 Vista trasera del difusor de aletas curvadas.....	33
Figura 35 Vista en planta del difusor de aletas curvadas .....	33
Figura 36 Inlet .....	34
Figura 37 Outlet.....	34
Figura 38 Surrounding .....	34
Figura 39 Floor.....	34
Figura 40 Diffuser .....	34
Figura 41 Roof.....	34
Figura 42 Rest of car .....	34
Figura 43 Mallada para el análisis del modelo turbulento .....	40
Figura 44 Residuos con k-Epsilon Standard.....	41
Figura 45 Resultado de las fuerzas con k-Epsilon Standard .....	41
Figura 46 Residuos con k-Epsilon two layers.....	42
Figura 47 Resultado de las fuerzas con k-Epsilon two layers .....	42
Figura 48 Residuos con k-Omega Standard.....	43
Figura 49 Resultado de las fuerzas con k-Omega Standard .....	43
Figura 50 Residuos con k-Omega (SST) .....	44
Figura 51 Resultado de las fuerzas con k-Omega (SST).....	44
Figura 52 Residuos con Spalart Allmaras.....	45
Figura 53 Resultado de las fuerzas con Spalart Allmaras .....	45
Figura 54 Residuos con Reynolds stress equation.....	46
Figura 55 Resultado de las fuerzas con Reynolds stress equation .....	46
Figura 56 Ejemplo de malla estructurada.....	47
Figura 57 Ejemplo de malla no estructurada .....	48
Figura 58 Ejemplo de malla hibrida .....	48





Figura 59 Surface wrapper .....	49
Figura 60 Surface remesher.....	50
Figura 61 Advancing layer mesher .....	51
Figura 62 Trimmed mesher .....	51
Figura 63 Mallado tetraédrico.....	52
Figura 64 Mallado poliédrico.....	52
Figura 65 Geometría estudiada por el artículo de referencia .....	53
Figura 66 Comparación de los residuos.....	53
Figura 67 Comparación de los resultados .....	53
Figura 68 Comparación del número de celdas .....	53
Figura 69 Comparación del tiempo .....	53
Figura 70 Residuos de la simulación óptima .....	59
Figura 71 Resultados de la simulación óptima .....	60
Figura 72 Diferencia entre una adecuada cara y una que no.....	61
Figura 73 Validez de caras caso sin difusor .....	62
Figura 74 Validez de caras caso difusor original.....	62
Figura 75 Validez de caras caso aletas rectas.....	62
Figura 76 Validez de caras caso aletas curvadas .....	63
Figura 77 Diferencia entre un adecuado salto volumétrico y otro que no .....	63
Figura 78 Validez de cambio de volumen caso sin difusor.....	64
Figura 79 Validez de cambio de volumen caso difusor original .....	64
Figura 80 Validez de cambio de volumen caso aletas rectas .....	64
Figura 81 Validez de cambio de volumen caso aletas curvadas.....	65
Figura 82 Ángulo de asimetría.....	65
Figura 83 Visión global del ángulo de asimetría (Caso sin difusor) .....	66
Figura 84 Validez del ángulo de asimetría caso sin difusor .....	66
Figura 85 Visión global del ángulo de asimetría (Caso original).....	66
Figura 86 Validez del ángulo de asimetría caso difusor original .....	66
Figura 87 Visión global del ángulo de asimetría (Caso aletas rectas) .....	67
Figura 88 Visión del difusor del ángulo de asimetría (Caso aletas rectas) .....	67
Figura 89 Validez del ángulo de asimetría caso aletas rectas .....	67
Figura 90 Visión global del ángulo de asimetría (Caso aletas curvadas) .....	67
Figura 91 Visión del difusor del ángulo de asimetría (Caso aletas curvadas) .....	68
Figura 92 Validez del ángulo de asimetría caso difusor original .....	68
Figura 93 Visión global del Y+ (Caso sin difusor) .....	69
Figura 94 Visión global del Y+ (Caso difusor original) .....	69
Figura 95 Visión global del Y+ (Caso aletas rectas).....	69
Figura 96 Visión global del Y+ (Caso aletas curvadas) .....	70
Figura 97 Mallado superficial (Caso sin difusor) .....	71
Figura 98 Mallado volumétrico (Caso sin difusor).....	71
Figura 99 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso sin difusor).....	72
Figura 100 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso sin difusor) .....	73
Figura 101 Flujo del aire global en modo vector (Caso sin difusor) .....	73

Figura 102 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso sin difusor).....	74
Figura 103 Flujo del aire vista superior en modo vector (Caso sin difusor).....	74
Figura 104 Presión relativa entorno el coche (Caso sin difusor).....	75
Figura 105 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso sin difusor) .....	76
Figura 106 Presión relativa del dominio vista planta (Caso sin difusor) .....	76
Figura 107 Mallado superficial (Caso difusor original) .....	78
Figura 108 Mallado volumétrico (Caso difusor original) .....	78
Figura 109 convergencia de los residuos (Caso difusor original) .....	79
Figura 110 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso difusor original) .....	79
Figura 111 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso difusor original).....	80
Figura 112 Flujo del aire global en modo vector (Caso difusor original) .....	80
Figura 113 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso difusor original) .....	81
Figura 114 Flujo del aire en la salida del difusor en modo vector (Caso difusor original) .....	81
Figura 115 Flujo del aire en la sección envolvente del difusor en modo vector (Caso difusor original).....	82
Figura 116 Presión relativa entorno el coche (Caso difusor original) .....	82
Figura 117 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso difusor original) .....	83
Figura 118 Presión relativa del dominio vista planta (Caso difusor original).....	83
Figura 119 Mallado superficial (Caso aletas rectas) .....	85
Figura 120 Mallado volumétrico (Caso aletas rectas) .....	85
Figura 121 Convergencia de los residuos (Caso aletas rectas).....	86
Figura 122 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso aletas rectas) .....	86
Figura 123 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso aletas rectas).....	87
Figura 124 Flujo del aire global en modo vector (Caso aletas rectas) .....	87
Figura 125 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso aletas rectas) .....	88
Figura 126 Flujo del aire vista superior en modo vector (Caso aletas rectas) .....	88
Figura 127 Presión relativa entorno el coche (Caso aletas rectas) .....	89
Figura 128 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso aletas rectas) .....	89
Figura 129 Presión relativa del dominio vista planta (Caso aletas rectas).....	89
Figura 130 Presión relativa en el difusor (Caso aletas rectas).....	90
Figura 131 Mallado superficial (Caso aletas curvadas) .....	92
Figura 132 Mallado volumétrico (Caso aletas curvadas).....	92
Figura 133 Convergencia de los residuos (Caso aletas curvadas) .....	92
Figura 134 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso aletas curvadas) .....	93
Figura 135 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso aletas curvadas) .....	93
Figura 136 Flujo del aire global en modo vector (Caso aletas curvadas).....	94
Figura 137 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso aletas curvadas) .....	94
Figura 138 Flujo del aire turbulento bajo el coche en modo vector (Caso aletas curvadas) .....	95
Figura 139 Presión relativa entorno el coche (Caso aletas curvadas).....	95
Figura 140 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso aletas curvadas) .....	96
Figura 141 Presión relativa del dominio vista planta (Caso aletas curvadas) .....	96



Figura 142 Presión relativa en el difusor (Caso aletas curvadas) .....	97
Figura 143 Fondo plano con elevación en el eje central .....	101

## Índice de ecuaciones

(1).....	6
(2).....	7
(3).....	8
(4).....	8
(5).....	10
(6).....	10
(7).....	10
(8).....	11
(9).....	11
(10).....	12
(11).....	12
(12).....	13
(13).....	16
(14).....	16
(15).....	16
(16).....	17
(17).....	17
(18).....	17
(19).....	18
(20).....	20
(21).....	20
(22).....	21
(23).....	22
(24).....	22
(25).....	23
(26).....	29
(27).....	102
(28).....	102
(29).....	103
(30).....	103
(31).....	104
(32).....	104
(33).....	105
(34).....	105

## Índice de tablas

Tabla 1 Configuraciones generadas para alcanzar un ben mallado.....	58
Tabla 2 Resultados grid independency del mallado.....	58
Tabla 3 Presión del vehículo (Caso sin difusor) .....	77
Tabla 4 Fuerza lift del vehículo (Caso sin difusor) .....	77
Tabla 5 Fuerza drag del vehículo (Caso sin difusor) .....	77
Tabla 6 Presión del vehículo (Caso difusor original).....	83
Tabla 7 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor original).....	84
Tabla 8 Fuerza drag del vehículo (Caso difusor original).....	84
Tabla 9 Presión del vehículo (Caso difusor aletas rectas) .....	90
Tabla 10 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor aletas rectas) .....	91
Tabla 11 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor aletas curvadas).....	91
Tabla 12 Presión del vehículo (Caso difusor aletas curvadas).....	97
Tabla 13 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor aletas curvadas).....	98
Tabla 14 Fuerza drag del vehículo (Caso difusor aletas curvadas).....	98
Tabla 15 Tabla comparativa de los resultados de los diferentes casos .....	99



## 1. Introducción

### 1.1. Objetivo del proyecto

El objetivo de este trabajo es simular los efectos causados por la presión y la velocidad en un modelo de un coche real, tal y como si se tratase de un túnel de viento, variando la geometría del difusor. Este método es el que se aplica en la propia automoción para reducir costes y conseguir mucho más tiempo para modificar la geometría de este.

Finalmente, la mejor manera de ver si funciona mejor o peor un difusor es comparando la fuerza que ejerce contra el suelo, fuerza llamada “downforce”. Por ende, los difusores diseñados deberán de mejorar la aspiración contra el asfalto incrementando el downforce del modelo. Además, se compararán con el del propio coche con el fin de ver cuál es la mejor elección.

### 1.2. Alcance del proyecto

Para este estudio, primero se debe crear o adquirir el modelo a estudiar en 3D. Seguidamente mediante un programa de Computational Fluid Dynamics (CFD) se desea simular varios casos para ver la variación de los efectos entre geometrías, más específicamente la del difusor, que desarrolla un papel fundamental para modelos de coche deportivos que alcanzan velocidades muy elevadas, y, por lo tanto, una gran variación de presiones.

Para lograr el correcto resultado se elaborará un grid independency por el que se buscará el mallado óptimo precisión-tiempo. Para ello, se discretizará el mallado en distintos tamaños y con distintas condiciones. Algunas de ellas puede que no sean las adecuadas a causa de la limitación de recursos de computación, pero siempre y cuando sea posible se elegirá la mejor opción.

El ordenador con el que se elaborará el estudio contiene las siguientes características:

- Procesador: Intel i7 con 2.6 GHz
- Núcleos: 4 físicos + 4 virtuales
- RAM: 16 Gb

## 2. Difusor

El difusor, es un elemento situado en la parte trasera de los vehículos de cuatro ruedas, más concretamente en la parte baja. Se suelen componer de plástico o fibra de carbono en aquellos vehículos más sofisticados. Este elemento puede estar compuesto de diferentes formas, con aletas (Figura 1); curvadas o rectas; o sin aletas (Figura 2).



Figura 1 Difusor con aletas de un Mercedes CLA [1]



Figura 2 Difusor sin aletas de un Ferrari F40 [2]

Su funcionalidad no es simplemente estética, aunque en coches de gama baja, cuyos no alcanzan o no deberían alcanzar por ley altas velocidades, sí que logra llamar la atención al cliente dándole un toque deportivo.

Sus verdaderas funciones son básicamente dos, una es provocar la parte divergente del efecto Venturi. Este fenómeno sucede al aumentar el área del flujo en el difusor, todo el flujo proveniente de los bajos del coche ha de acelerarse justo en su entrada para ocupar el nuevo volumen, de esa forma se logra una depresión en esa zona y, efectivamente, downforce (carga aerodinámica).

Y la segunda trata sobre la salida del flujo, este requiere que el flujo sea lo más ordenado posible y, por lo tanto, de crecimiento progresivo para no provocar turbulencias en el interior ni muy cerca de la salida del flujo. Gracias a la progresividad del aumento de sección el aire en la salida es adecuado a la velocidad del exterior, sin ello aumentaría la resistencia de avance.

No obstante, como ya se ha mencionado anteriormente este elemento es poco habitual en los coches por su funcionalidad, en cambio en el mundo de la competición el difusor ha sido un elemento que ha marcado en gran medida las diferencias entre unos y otros.

Un caso sería el de la tan distinguida Formula 1, donde escuderías con un mejor desarrollo de aerodinámica han logrado, con un mismo motor, menores consumos, mayor potencia y manejo del coche por el paso de curva entre otras.

Años más tarde, no solo las características del motor eran restringidas en esta competición, sino que también las dimensiones del difusor, que indican que debe empezar desde el eje trasero y no superar cerca del metro de ancho y 175 mm de alto. El ingenio en este tipo de competición puede acentuar una mejora de las prestaciones por completo.

Tal y como se aprecia en la Figura 3 gracias al ingenio de jugar con el difusor el equipo Brawn GP logró ganar el mundial de escuderías ese año. En él desarrollo un doble difusor mucho más efectivo que el de Toyota y Williams, dicho difusor ya se había diseñado en los años 80 pero hasta ese año no se volvió a oír hablar de él por el reglamento de entonces.

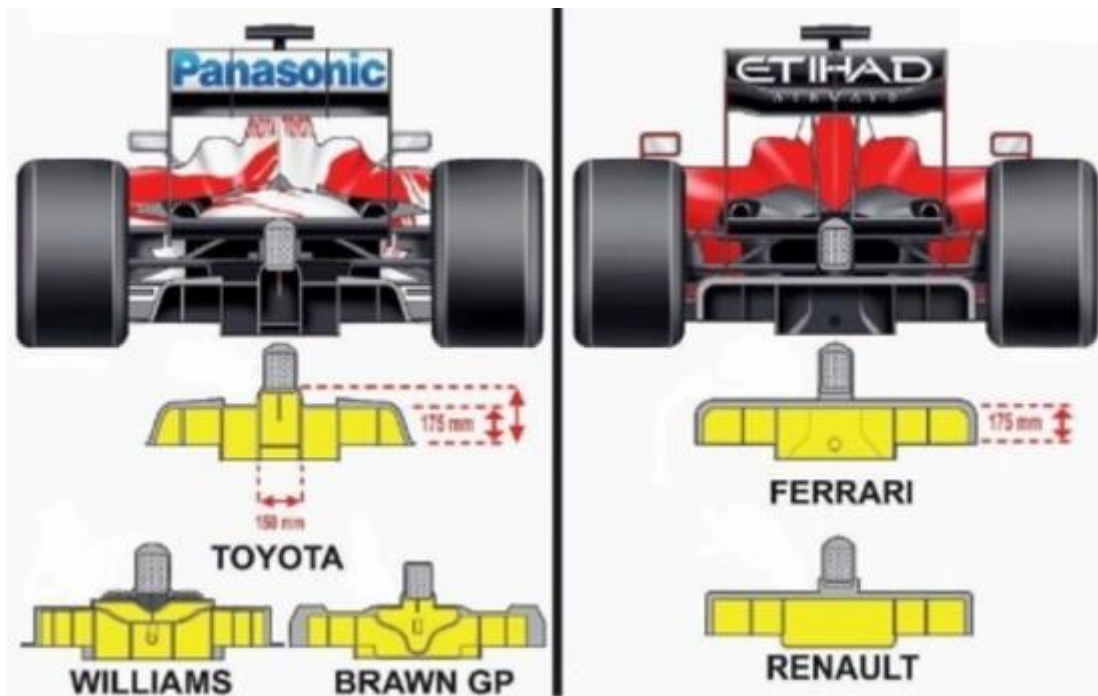


Figura 3 Diferentes diseños de difusores en la F1 [3]

El doble difusor lo que proporciona es una mayor extracción de aire por el difusor, inyectándose en la parte inicial, antes de producirse el desnivel de altura, véase Figura 4. De esta manera aumenta la velocidad por su paso disminuyendo la presión y obteniendo una downforce mucho mayor.



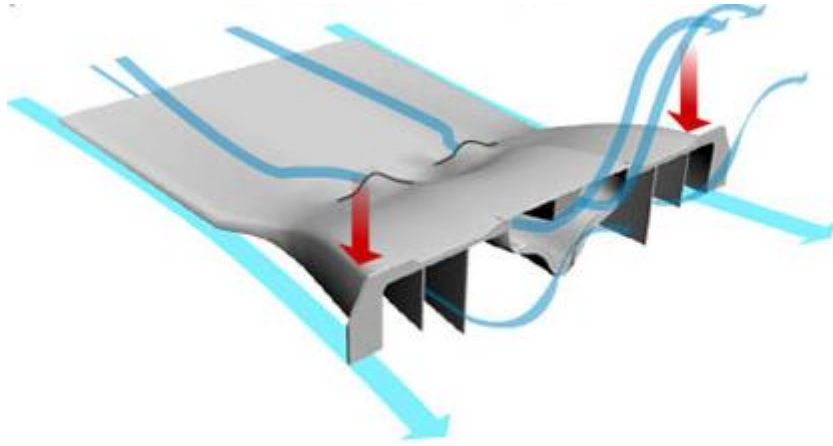


Figura 4 Doble difusor de Brawn GP [4]

Otro elemento generador de carga aerodinámica es el alerón, el cual provee los mismos beneficios que el difusor, pero con la peculiaridad de que a diferencia del difusor este genera una gran resistencia aerodinámica o también conocida como “drag”, véase Figura 5.



Figura 5 Efecto drag del alerón en un Formula 1 [5]

Tal y como se observa en la Figura 5, el impacto del aire sobre el alerón connota una gran resistencia al aire haciendo desplazarse el aire en una dirección diferente a la proyectada sobre el ala formándose el drag. Este no tiene por qué ser del todo un inconveniente siempre y cuando no sea fijo.

En la Formula 1 utilizan dos modos: el de las zonas Drag Reduction System (DRS) (Figura 6), donde abren el alerón formando un ángulo de proyección menor, reduciendo así la resistencia aerodinámica y logrando una velocidad punta mayor. Y por otro lado la configuración en la que aparece en la imagen, que se utiliza en el resto de zonas del circuito. En la que se benefician de una mejor estabilización del coche y una mayor frenada por el incremento a la resistencia del avance.

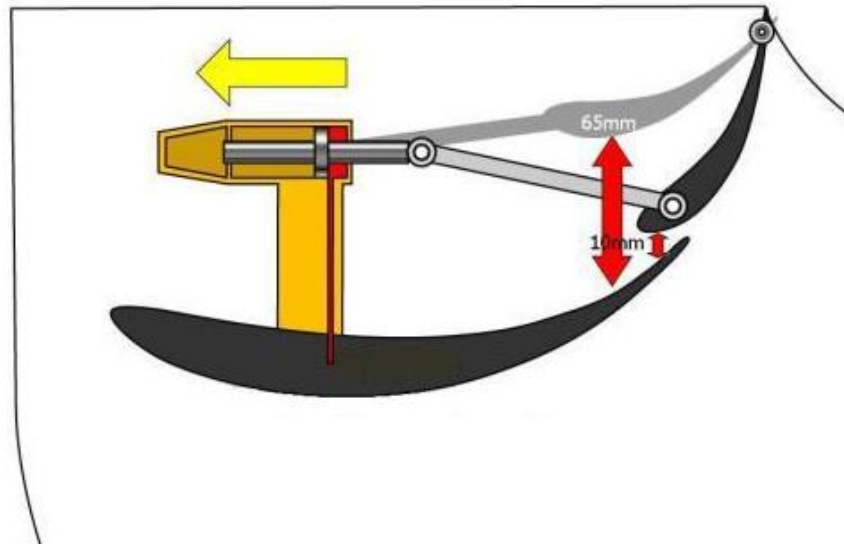


Figura 6 Sistema de activación del DRS [6]

Visto ambos elementos, imprescindibles para las competiciones, ambos han sido desarrollados para obtener la mayor carga aerodinámica con la menor fuerza de resistencia al avance, a pesar de tener ciertas diferencias, como su geometría y su posición. Asimismo, el alerón trabaja con el flujo de viento que fluye por la parte de arriba de la carrocería mientras que el difusor lo hace con los bajos y en algunos casos con tomas de aire adyacentes a los laterales del propio vehículo.

A la hora de diseñarlos tienen dos metodologías: la primera consta de la creación de un prototipo a pequeña escala o incluso de un tamaño bastante cercano al real, este último con un coste superior. Con el propósito de aplicarles una corriente de aire y observar el comportamiento del aire a su alrededor.

La otra metodología, menos costosa, es la que se va a emplear en este proyecto, y trata de simular numéricamente mediante un programa de CFD. En él se introduce el diseño en 3D, mayormente, y se observa de igual manera el flujo del aire en su entorno,

pudiendo tomar decisiones en cuanto su diseño y resolverlo en un período de tiempo bastante más reducido que el anterior. El inconveniente de este método es una solución no del todo real, ya que el flujo de aire que envuelve dicho prototipo es discretizado en un cierto número de celdas las cuales simplifican todo el cálculo que ello conlleva.

Haciendo un inciso de nuevo a la Formula 1, en esta competición de tan estricto trabajo y exactitud no pueden solo estudiar los monoplazas con esta herramienta, pero les sirve de guía para estudiarlos a posteriori en el túnel de viento y finalmente en circuito.

### 3. Teoría sobre mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es el estudio del movimiento de los fluidos interaccionados con el medio que les envuelve y limita junto con las fuerzas que ejerce sobre el propio medio.

Un fluido se puede definir numéricamente mediante las tres componentes de la velocidad además de dos magnitudes termodinámicas como la presión y la densidad del fluido. De esta forma, el fluido queda totalmente definido.

El comportamiento de cualquier flujo es modelado por las ecuaciones de conservación de masa y del momento.

#### 3.1. Ecuaciones de conservación

##### 3.1.1. Conservación de masa

Esta ecuación justifica, tal y como indica su nombre, que la materia que circula por un flujo ni se genera ni se destruye en todo su recorrido. Numéricamente es expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum \left( \frac{\partial (\rho \cdot U_i)}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$U_i$ : Velocidades en las direcciones  $x, y$  y  $z$  (m/s)

$x_i$ : Dirección de coordenadas (m)

$t$ : Tiempo (s)

En esta ecuación se ve reflejada la variación de masa por unidad de volumen respecto al tiempo en el primer término, mientras que los tres siguientes reflejan la variación de la velocidad que entra y sale en sus respectivas direcciones.

### 3.1.2. Conservación del momento

La conservación del momento justifica que la variación de cantidad de movimiento en el fluido ha de ser igual a las fuerzas que ejercen sobre él. De esta manera se desarrollan tantas ecuaciones como dimensiones tenga el estudio, en este caso será en 3D. Para no repetir constantemente lo mismo se define la ecuación (2) como la cantidad de movimiento en el eje  $x$ , las otras dos ecuaciones serán iguales, pero modificando el eje de coordenadas en el que fluyen.

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + \sum \left( U_{ij} \cdot \frac{\partial U_{ij}}{\partial x_{ij}} \right) = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P_j}{\partial x_{ij}} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \sum \left( \frac{\partial^2 U_{ij}}{\partial x_{ij}^2} \right) + g \quad (2)$$

Donde

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$U_i$ : Velocidades en las direcciones  $x, y$  y  $z$  (m/s)

$x_i$ : Dirección de coordenadas (m)

$t$ : Tiempo (s)

$P$ : Presión en su respectiva coordenada (Pa)

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido (kg/m·s)

$g$ : Gravedad en su respectiva coordenada (m/s<sup>2</sup>)

### 3.2. Números adimensionales

En estudios con una cierta complejidad son necesarios el uso de números adimensionales para ayudar a entender el comportamiento de aquello que se esté estudiando, en este caso el fluido de un gas.

Los números adimensionales se expresan como una relación entre distintas propiedades y sus dimensiones, resultando un parámetro que ayuda a guiar y controlar varias características a la vez. Una peculiaridad es que no existe un único resultado, ya que son una combinación entre ellos y por lo tanto el incremento de un valor directamente proporcional al decremento de otro puede constituir un mismo valor adimensional.

Los números más utilizados en aerodinámica son el número de Mach y el de Reynolds.

#### Mach

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (3)$$

Donde:

$v$ : Velocidad del fluido (m/s)

$c$ : Velocidad del sonido (m/s)

#### Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (4)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$v$ : Velocidad del fluido (m/s)

$L$ : Longitud característica (m)

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido (kg/m·s)

El número de Mach proporciona una idea sobre la velocidad y la compresibilidad del fluido. Se considera que un fluido es incompresible cuando  $Ma < 0,3$ . Estar dentro de esta región simplifica en gran medida la solución ya que se puede considerar una densidad constante en vez de un gas ideal o real.

Por otro lado, el número de Reynolds indica en que rango de turbulencia se está posicionado. Con valores  $Re < 2300$  se considera flujo laminar y  $Re > 5000$  turbulento.

### 3.3. Fuerzas aerodinámicas: downforce y drag

Con el fin de entender mejor la física que envuelve el coche se definen las fuerzas provocadas y se describirán a posteriori. En la Figura 7 se han representado las fuerzas que actúan sobre el coche cuando este está en movimiento, definidas de rojo las que van en sentido contrario a las coordenadas de referencia y en verde las que van en sentido positivo.

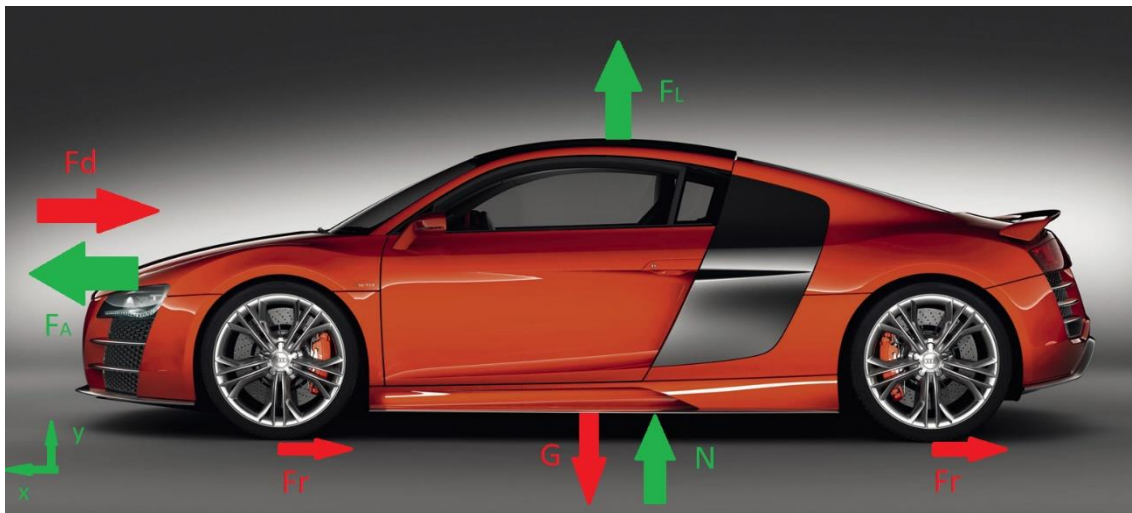


Figura 7 Fuerzas que actúan en el coche [7]

**FA (Fuerza de avance):** La fuerza de avance es la fuerza que transmite el motor a las ruedas haciendo avanzar al coche. Hay que tener en cuenta que existen una serie de pérdidas desde que dicha fuerza sale del motor hasta llegar a las ruedas. Esta fuerza puede ser calculada de la manera siguiente:

$$F_A = \frac{P}{v} \quad (5)$$

Donde:

$P$ : Potencia que llega a las ruedas (W)

$v$ : Velocidad del coche (m/s)

**N (fuerza normal)**: La fuerza normal es la reacción entre el coche y el suelo, sin ella el coche atravesaría el suelo según la tercera ley de Newton.

$$F_N = G + F_L \quad (6)$$

Donde:

$G$ : Fuerza gravitatoria (N)

$F_L$ : Fuerza de lift (N)

**Fr (Fuerza fricción)**: La fuerza de fricción entre los neumáticos y el asfalto es una simplificación de todo el análisis que hay detrás, pero, se puede definir como la fuerza normal por el coeficiente de rodadura, ya que el coeficiente de rozamiento sucede cuando la rueda está deslizándose.

$$F_r = N \cdot C_r \quad (7)$$

Donde:

$N$ : Fuerza normal (N)

$C_r$ : Coeficiente de rodadura (-)

**G (fuerza de la gravedad):** Esta fuerza no es más que el peso del vehículo.

$$G = m \cdot g \quad (8)$$

Donde:

$m$ : Masa (kg)

$g$ : Gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

**Fd (Fuerza drag):** Se le llama fuerza de drag, de arrastre o de forma aquella fuerza aerodinámica que se ejerce sobre el coche en la dirección del flujo, o, dicho de otra manera, la fricción del aire.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A_d \quad (9)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$ : Velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ )

$C_d$ : Coeficiente de drag (-)

$A_d$ : Área frontal del cuerpo proyectada en la dirección de desplazamiento ( $\text{m}^2$ ) (Figura 8)

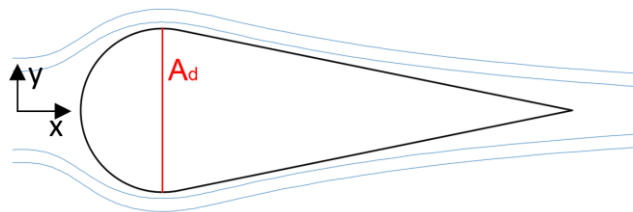


Figura 8 Área drag

Cuando las partículas del aire entran en contacto con el cuerpo, son adheridas por la viscosidad (véase Figura 9) y crean el fenómeno capa límite, en el que todas aquellas partículas cercanas son ralentizadas. De esta manera es como se crea la resistencia al avance. En este caso la velocidad máxima del coche se obtendrá cuando la fuerza de avance sea equiparada a la del drag.





*Figura 9 Adhesión de la primera capa de aire [8]*

De la fórmula anterior, se despeja el término  $C_d$  para obtener definida la expresión del coeficiente de drag. El cual, más adelante servirá para comparar el modelo creado en 3D con el real. Este coeficiente es otro número adimensional con el que se cuantifica la resistencia al avance de un cuerpo. Cuanto mayor sea, mayor es la resistencia que opone.

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho \cdot v^2 \cdot A_d} \quad (10)$$

**$F_L$  (Fuerza lift):** Se le llama fuerza lift o de sustentación a aquella fuerza perpendicular a la dirección del flujo. Esta fuerza depende de la geometría del cuerpo y puede ir en ambos sentidos, para el positivo (referente a la Figura 7) se le llama lift, como se ha comentado, y en sentido contrario, downforce. Y se expresa de la siguiente manera:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_L \cdot A_L \quad (11)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$v$ : Velocidad del fluido (m/s)

$C_L$ : Coeficiente de lift (-)

$A_L$ : Área frontal del cuerpo proyectada en la dirección perpendicular de desplazamiento ( $m^2$ ) (Figura 10)

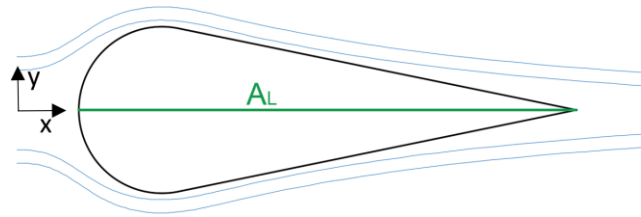


Figura 10 Área lift

Como se comentaba anteriormente, la fuerza de lift es dada cuando el flujo ha de recorrer diferentes trayectorias de corriente por la parte superior e inferior. Al ser diferentes trayectorias significa que no van a la misma velocidad y, por lo tanto, tampoco con la misma presión. Es entonces esta diferencia de presión la que provoca una fuerza ascendente o descendente.

La downforce tiene un sentido más lógico en este proyecto, ya que será la fuerza que ejerza el difusor contra el suelo para obtener un mayor agarre en el asfalto en el paso por curva. Por otro lado, de no haber difusor y crearse lift, este no podría despegar el coche del suelo ya que, como se ha definido anteriormente, debería de superar el peso del coche.

Sin embargo, este coeficiente puede ser utilizado también en la rama aeroespacial, donde ambas fuerzas tienen una importancia del mismo peso. Los aviones varían la geometría de sus alas con el fin de utilizar la fuerza lift para despegar y la downforce para aterrizar.

De la misma forma que antes, se despeja el coeficiente de lift  $C_L$  de la ecuación (11), obteniendo otro número adimensional pero ahora en el eje vertical.

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot v^2 \cdot A_L} \quad (12)$$

### 3.4. Capa límite

La capa límite es la zona en la que se origina una variación de velocidades en relación a la distancia del flujo con el cuerpo que le ha perturbado. La distribución de velocidades de esta capa varía dependiendo de si es un flujo laminar o turbulento.

Para el laminar se conoce que comienza con la primera partícula adherida al cuerpo con velocidad relativa nula. A partir de ahí se describe una parábola en la que la velocidad de las partículas colindantes se ven frenadas por esta primera hasta alcanzar el valor de la velocidad de entrada, que no es perturbado, también llamado flujo libre (freestream).

Tal y como se puede observar en la Figura 11, desde la primera partícula de gas adherida al cuerpo hasta una distancia  $x$ ,  $x_{\text{crítico}}$  en este caso, el grosor de la capa laminar ( $\delta$ ), que es la distancia entre la partícula con velocidad nula hasta la que tiene un 99% de la velocidad freestream, aumenta en dirección de  $y$ . Es a partir de entonces cuando puede cambiar formándose una capa turbulenta

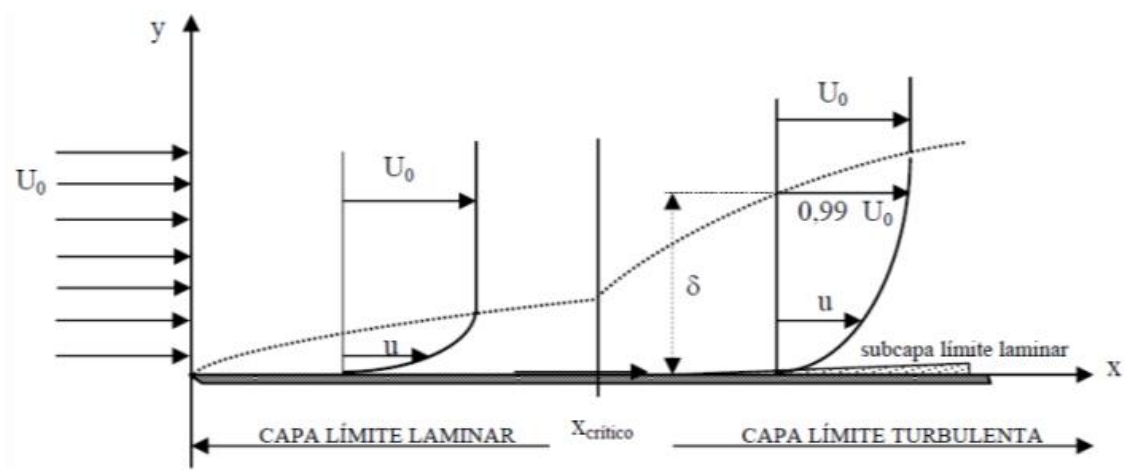


Figura 11 Distribución de velocidades según el tipo de capa límite [9]

Para el caso del flujo turbulento, la capa límite describe una forma bastante parecida, aunque no tan fácil de definir ya que se originan fenómenos turbulentos. A este fenómeno se le denomina capa límite turbulenta.

La capa límite se divide en dos capas: La externa, donde el flujo alcanza un 99% de la velocidad de flujo libre en su punto más álgido, y la interna, formada por 3 subcapas

más: la viscosa, la zona intermedia y la logarítmica que conforman entre un 10% y un 20% del total.

Adentrándose en las subcapas turbulentas se puede distinguir tres regiones delimitadas por unas líneas verticales de color verde en el gráfico de la Figura 12. Estas regiones son descritas a partir de las ecuaciones de la viscous sublayer y la log-law (líneas de color azul). Tal y como se puede apreciar, la unión de ambas representaciones provoca una deformación entre medio que origina la región buffer layer dividiendo así la subcapa interior en tres. Como es de esperar, cada región es definida por un conjunto de ecuaciones diferente que son mostradas a continuación.

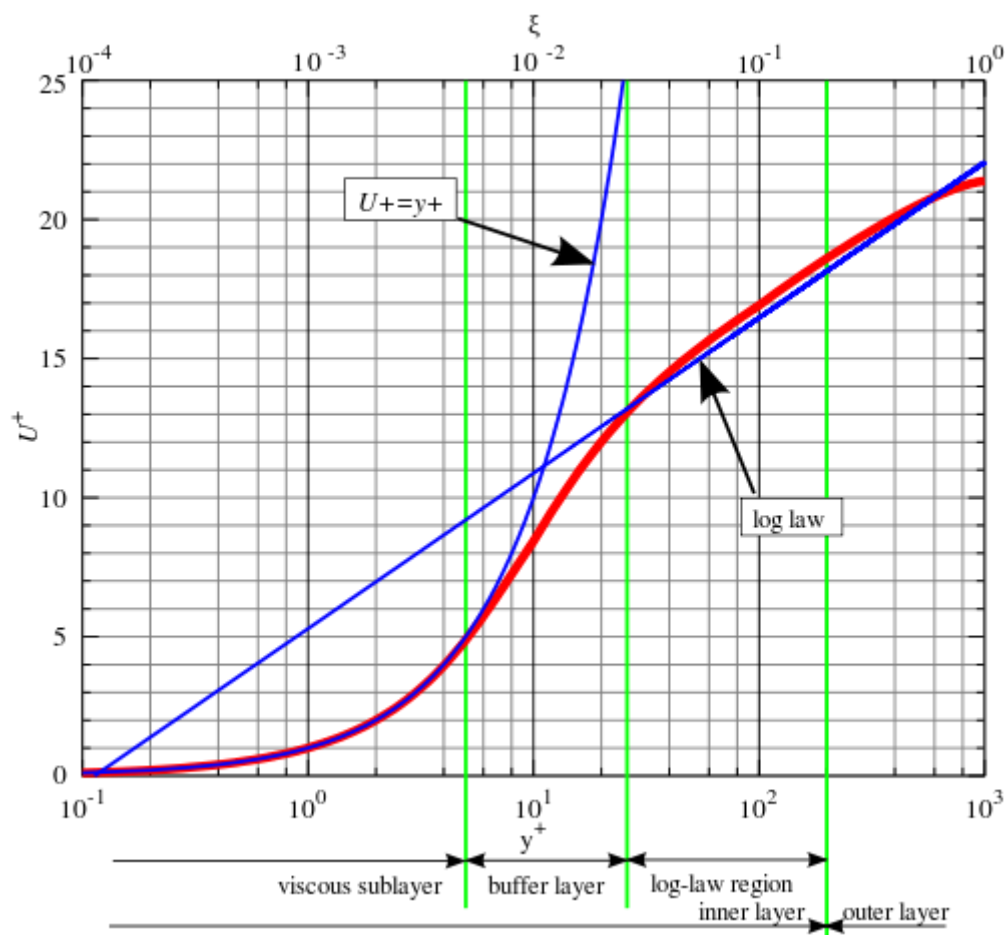


Figura 12 Representación de la distribución de velocidades según su región de subcapa [10]

Donde:

$y^+$ : Coordenada de referencia que indica la región de subcapa en la que yace el flujo (-)

$u^+$ : Velocidad de referencia frente la de fricción (-)

### 3.4.1. Subcapa viscosa ( $y^+ < 5$ )

Al estar tan cerca de la superficie la tensión viscosa en esta fina región domina sobre el flujo inhibiéndose de cualquier turbulencia, por lo tanto, el flujo es casi laminar. Como consecuencia, la tensión cortante turbulenta se desprecia y la laminar es igual al de la pared.

La relación velocidad-distancia mantenida en esta subcapa es definida en las ecuaciones (13) y (14).

$$u^+ = y^+ \quad (13)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_T} \quad (14)$$

Donde:

$y^+$ : Coordenada de referencia que indica la región de subcapa en la que yace el flujo (-)

$u^+$ : Velocidad de referencia frente la de fricción (-)

$u$ : Velocidad dentro la capa (m/s)

$u_T$ : Velocidad de fricción (m/s)

### 3.4.2. Subcapa buffer and Log-law (intermedia), ( $5 < y^+ < 500$ )

La capa log-law ( $30 < y^+ < 500$ ) es caracterizada por yacer ambas viscosidades además de los efectos turbulentos. La tensión cortante se mantiene constante e igual al de la pared. Esta subcapa se define en la ecuación (15).

Entre medio de la subcapa viscosa y la log-law aparece la subcapa buffer ( $5 < y^+ < 30$ ) donde las tensiones viscosas son equiparables a la turbulentas.

$$u^+ = \frac{1}{k} \cdot y^+ + B = \frac{1}{k} \cdot \ln E y^+ \quad (15)$$

Donde:

$k, B$  y  $E$ : Son distintas constantes para flujos turbulentos dependientes de la rugosidad de la pared.

### 3.4.3. Subcapa exterior ( $y^+ > 500$ )

Dejando atrás la subcapa interior yace la exterior donde los efectos viscosos se vuelven despreciables y es descrita por la siguiente relación velocidad-distancia (véase ecuación (16))

$$\frac{U_{max} - U}{u_T} = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{y}{y_0} + A \quad (16)$$

Donde:

$U_{max}$ : Velocidad del flujo no perturbado (m/s)

$U$ : Velocidad en un punto (m/s)

$u_T$ : Velocidad de fricción (m/s)

$y_0$ : Distancia de la capa límite donde la velocidad va a cero (m)

Para determinar el grosor de la capa más fina en toda la capa límite, y de esta manera conocer con una profunda exactitud el comportamiento del fluido cerca del difusor, se emplean las siguientes ecuaciones (17), (18) y (19):

$$y^+ = \frac{\Delta y}{\nu} \cdot u_T \quad (17)$$

Donde:

$y^+$ : Coordenada de la capa límite (-)

$\Delta y$ : Longitud de la capa límite (m)

$\nu$ : Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$u_T$ : Velocidad de fricción (m/s)

$$u_T = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (18)$$

Donde:

$\tau_\omega$ : Tensión cortante del fluido

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$$\tau_{\omega} = \mu \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (19)$$

Donde:

$\mu$ : Viscosidad dinámica ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )

$u$ : Velocidad dentro la capa ( $\text{m/s}$ )

$y$ : Distancia de la pared (m)

Por otra parte, la inserción de la capa límite en el programa de CFD se puede discretizar su grosor de capas se utilizando un mallado llamado Prism Layer Mesher, el cual permite crear estas capas mediante dos funciones: Geometric Progression y Hyperbolic Tangent. La primera de ellas se le han de introducir las entradas de grosor (prism layer thickness), el ratio de extensión de una capa a otra (prism layer stretching) y el número de capas. Como salida el programa calcula el grosor de cada capa hasta llegar a la introducida.

Por otro lado, la función Hyperbolic Tangent se le introducen las entradas de grosor (prism layer thickness), el número de capas, todo hasta ahora como el anterior, y el grosor de la primera capa adyacente al cuerpo. Como salida el programa calcula el ratio de extensión necesaria.

La primera función es válida cuando la precisión deseada en el cuerpo no requiere de gran exactitud, la segunda, en cambio, permite una mayor exactitud si lo que se desea es como varia el flujo entorno cada subcapa nombrada anteriormente con mayor exactitud. Por el contrario, esta segunda función, como es de esperar, consume una mayor cantidad de recursos.

### 3.5. Desprendimiento de la capa límite

No obstante, puede ocurrir un desprendimiento de la capa límite. Este fenómeno es debido a una pérdida de la energía cinética de las partículas colindantes al cuerpo, lo que provoca que desaparezca la capa límite de la superficie del mismo cuerpo. Al

desaparecer se crea un desajuste del flujo ocasionando turbulencias y una zona de muy baja presión debido a ello, lo cual incrementa la resistencia de forma ( $F_d$ ) debida a la diferencia de presiones originada.

De esta manera, interesa que la capa límite no se desprenda nunca y en caso de que se aparezca, que sea lo más tarde posible. La capa límite laminar adopta una resistencia de fricción menor, sin embargo, a la vez también presenta una resistencia de forma mayor que la turbulenta. En cambio, la turbulenta es completamente del revés teniendo una mejor resistencia al fenómeno de desprendimiento tal y como se puede observar en la Figura 13.

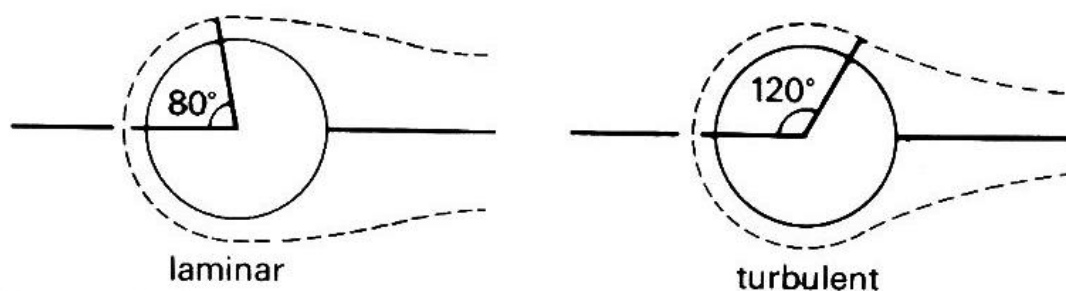


Figura 13 Desprendimiento de la capa límite [11]

Lo que significa que en caso de desprendimiento es aconsejable que se haya originado una capa límite turbulenta y si existe una laminar que sea lo más pequeña posible. La resistencia de forma afecta con un mayor peso el estudio del conjunto, es por ello que en este proyecto se va a preferir una capa límite turbulenta.

Para saber si la capa límite va a ser laminar, turbulenta o laminar y turbulenta se utiliza la ecuación de Reynolds, ecuación (4), despejando la longitud  $L$ , que en este caso será la longitud de la capa laminar. Para imponer que sea laminar se han de introducir el Reynolds entre  $Re_L = 2 \cdot 10^5$  y  $Re_L = 5 \cdot 10^5$ , se escoge el más desfavorable  $Re_L = 5 \cdot 10^5$ .

Mediante una tabla de las propiedades del aire a presión atmosférica<sup>[1]</sup> se extraen los datos necesarios para el cálculo a temperatura ambiente: 22 °C.

$$\rho_{22^\circ C} = 1,196 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$\mu_{22^\circ C} = 1,8346 \text{ (kg/m}\cdot\text{s)}$$

[1]: ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, "Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones", 1ª edición, McGraw-Hill, 2006



La velocidad con la que se desea realizar el estudio resulta ser una variable aleatoria en este proyecto y definida por el diseñador de dicho proyecto. En este caso, para reflejar unos datos con mayores gradientes de velocidad y presión es elegida una velocidad de 55,56 m/s.

Seguidamente, se aplica la ecuación (4) despejando la longitud  $L$  y se obtiene un valor de  $L = 138 \text{ mm}$ . Lo que significa que a partir de entonces cambia la capa límite de laminar a turbulento. Comparando este valor con la longitud total del coche (4,4 m) se puede llegar a despreciar la capa laminar, ya que representa un 3,14% de la longitud total, y considerándolo todo como turbulento.

En este punto se desea saber cuál es el valor de Reynolds real que hay en la parte del difusor aplicando una fórmula complementaria de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_H}{\mu} \quad (20)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$ : Velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ )

$D_H$ : Diámetro hidráulico (m)

$\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )

$$D_H = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}} \quad (21)$$

Donde:

$\text{Área}$ : Sección de entrada del fluido ( $\text{m}^2$ )

$\text{Perímetro}$ : Perímetro de entrada del fluido (m)

Calculados en el programa 3D se obtiene:

$$\text{Área} = 0,2454 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro} = 3,9055 \text{ m}$$

Finalmente aplicando los valores anteriormente mencionados para la longitud de la capa laminar a la ecuación (20) más los del cálculo del diámetro hidráulico a su ecuación (21) se obtiene un Reynolds  $Re = 910.020$ .

Ahora se puede calcular el grosor de la capa mediante la siguiente ecuación (22):

$$\delta = \frac{0,37 \cdot x}{Re^{\frac{1}{5}}} \quad (22)$$

Donde:

$x$ : Longitud del coche

$Re$ : Reynolds

Aplicando los valores anteriormente calculados se obtiene un grosor  $\delta = 10,468 \text{ cm}$ .

Una vez calculados se calcula el grosor necesario para obtener una buena lectura de las subcapas existentes en el difusor, para ello se utilizan las ecuaciones (17), (18) y (19) descritas en el apartado anterior 3.4.. Como consecuencia se obtiene que  $\Delta y = 4,9333 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ .

Por lo tanto, el flujo que atraviesa los bajos del coche forma una capa turbulenta con un  $Re = 910.020$ , con un grosor  $\delta = 10,468 \text{ cm}$  y una capa mínima de  $\Delta y = 4,9333 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ .

### 3.6. Bernoulli y efecto Venturi

La ecuación de Bernoulli estudia el comportamiento de un fluido entre dos puntos, véase ecuación (23) y Figura 14. Si ambos puntos están a la misma altura  $h_1 = h_2$  entonces cualquier cambio de presiones y/o velocidades hará variar al otro componente, de manera que, si la diferencia de presiones disminuye la diferencia de velocidades aumenta y viceversa.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (23)$$

Donde:

$P_i$ : Presión del fluido en cada punto (Pa)

$v_i$ : Velocidad del fluido en cada punto (m/s)

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

La ecuación de conservación de masa se define como que la cantidad de flujo (caudal) que entra por un conducto ha de ser el mismo que el que sale, teniendo en cuenta que se trata de un fluido incompresible y de densidad no variable. De esta manera, tal y como se aprecia en la ecuación (24), Si la superficie del conducto aumenta, la velocidad disminuye y viceversa.

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (24)$$

Donde:

$A_i$ : Superficie de entrada y salida (m<sup>2</sup>)

$v_i$ : Velocidad de entrada y salida (m/s)

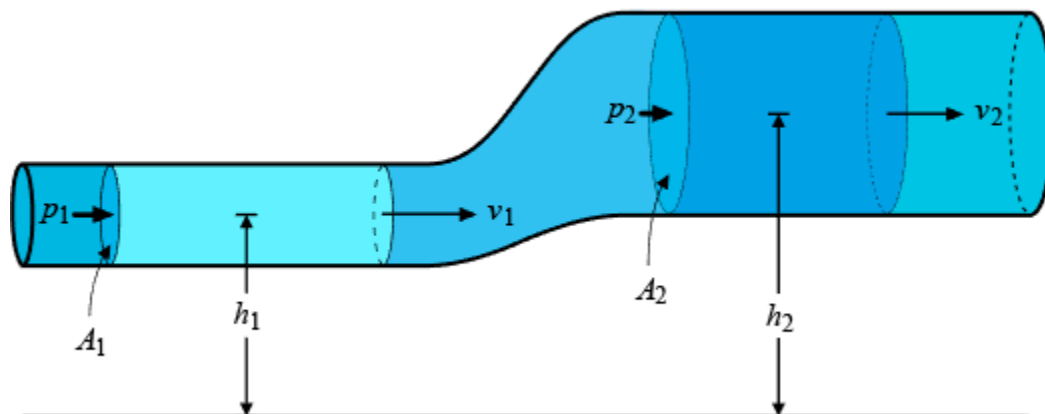


Figura 14 Conducto basado en la ecuación de Bernoulli y el efecto Venturi [12]

De esta forma se explica lo que sucede en los bajos y el difusor del coche (Figura 14), dónde se desea que toda la parte plana obtenga altas velocidades que provoquen bajas presiones, mientras que en la salida se agranda la superficie para disminuir la velocidad

y obtener mayores presiones en la parte de atrás del vehículo, empujándolo hacia delante.

Una manera observar la variación de velocidad es aplicando un coeficiente de presión ( $C_p$ ) que esta relacionado con el coeficiente de lift definido a continuación, ecuación (25):

$$C_p = 1 - \frac{v^2}{v_{ini}^2} \quad (25)$$

Donde:

$v$ : Velocidad en un punto (m/s)

$v_{ini}$ : Velocidad inicial (m/s)

De esta manera, se puede observar la distribución de velocidades y presiones entorno el perfil del coche. Este valor define si respecto la velocidad de entrada la velocidad dónde se ha situado el punto disminuye resultando con un valor positivo, entre 0 y 1. El valor 0 para aquellas regiones donde la velocidad es alta con presión bajas y el 1 para zonas donde se pueden crear “vacíos” con velocidad nula. Este fenómeno no sucederá, pero se pueden tener valores cercanos a él.

#### 4. Diseño del coche en 3D

La geometría del coche hay dos posibilidades de obtenerla: una es creándola uno mismo y la otra es obteniendo un esbozo. Para este proyecto se ha decantado por la segunda opción ya que el tiempo es un factor clave.

El automóvil elegido es un Audi R8 4.2 FSI Quattro (véase Figura 15 y Figura 16 para ver la geometría real). En la Figura 17 se describen las dimensiones reales del coche con el objetivo de mantener todas aquellas que asignan una dimensión exterior y que, por lo tanto, son relevantes para conseguir resultados lo más parecidos posible en el modelo 3D.



Figura 15 Parte trasera Audi R8 [13]



Figura 16 Parte frontal Audi R8 [14]

A continuación, se adjuntan datos<sup>[2]</sup> del modelo que son útiles para comparar a posteriori con el simulado.

Datos del 4.2 FSI Quattro

Coeficiente drag Cd:	0.34
Área frontal:	1.99 m <sup>2</sup>
Peso:	1560 kg



## Audi R8 V10 plus Coupé

Abmessungen  
Dimensions  
07/12

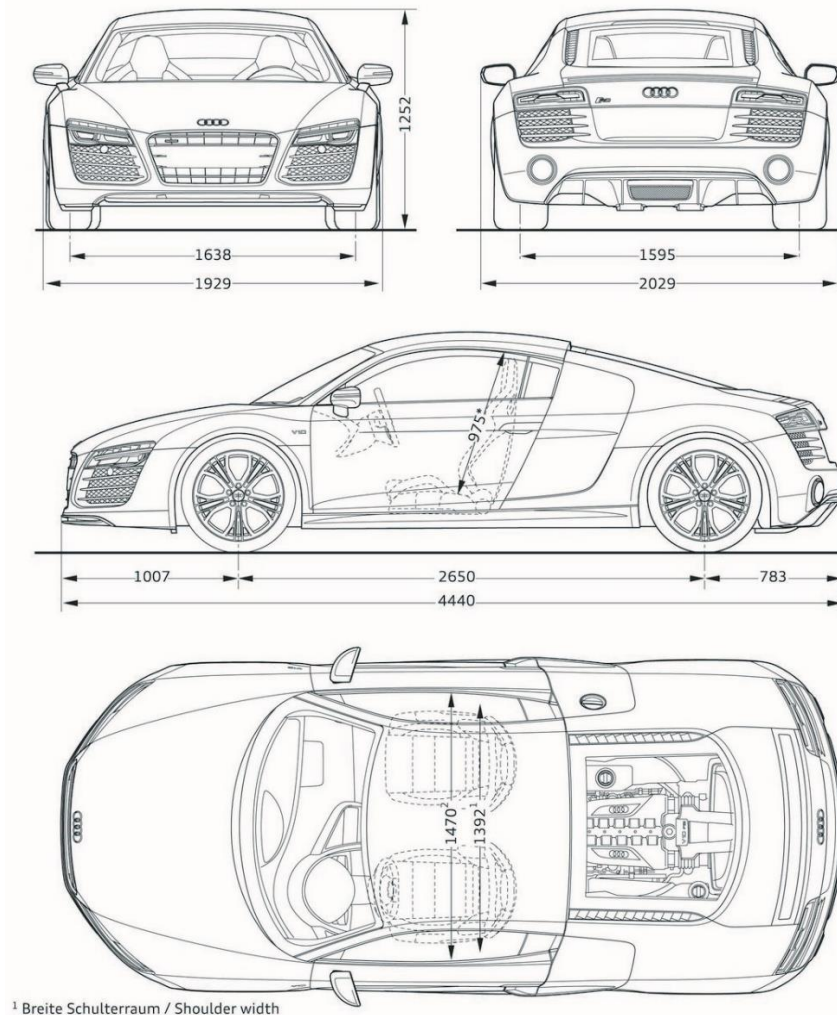


Figura 17 Dimensiones reales del modelo a estudiar [15]

En la Figura 18 se muestra el gran trabajo de aerodinámica del coche habiendo diseñado conductos que distribuyen el flujo de aire del suelo, ya sea a otras zonas del coche, como el compartimento del motor; ayudándolo a refrigerar; o creando nuevas salidas de aire que complementan con el difusor, tal y como se ha explicado al principio cómo un doble difusor, incluso se puede observar el discreto diseño del difusor, que aprovecha parte del hueco de la rueda para captar aire.

Desgraciadamente, esto lleva un gran trabajo de modelado en 3D, por lo que se ha considerado todo el suelo como una superficie plana despreciando los huecos y canales



de distribución del aire a excepción del difusor, que no será exactamente igual porque el hueco de la rueda está sellado.

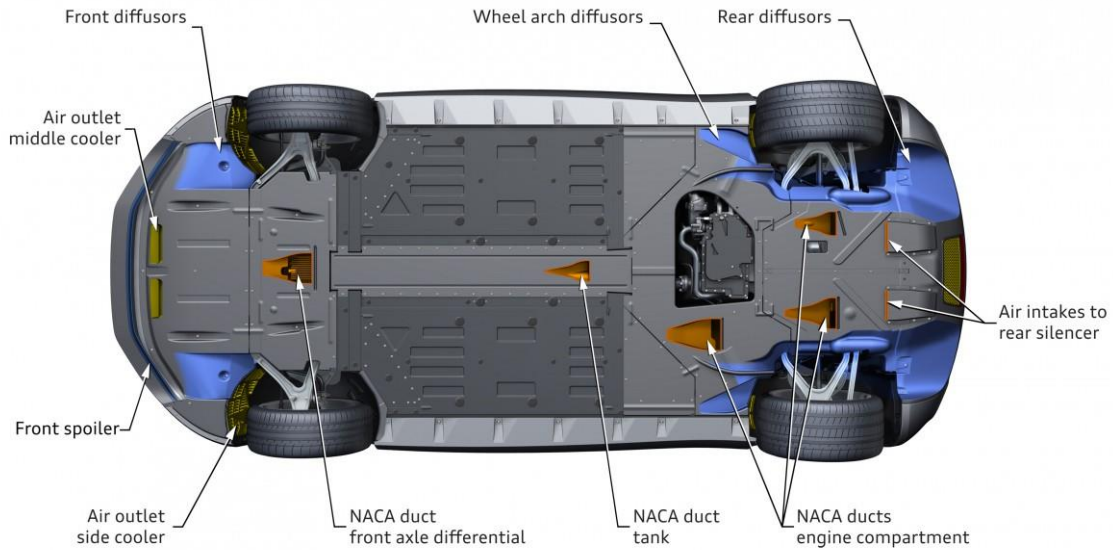


Figura 18 Vista de los bajos del modelo [16]

El modelo 3D que va a ser simulado ha sido obtenido en una librería de internet<sup>[3]</sup>, este necesita ser modificado para poder introducirlo al programa de CFD. Los requerimientos son los siguientes:

- Ha de ser un sólido.
- Ninguna cara entrecruzada.
- Ninguna cara abierta.
- Archivo compatible con el programa.

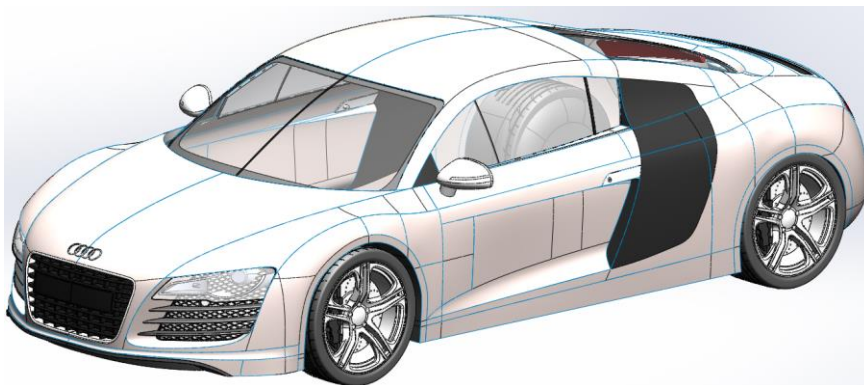
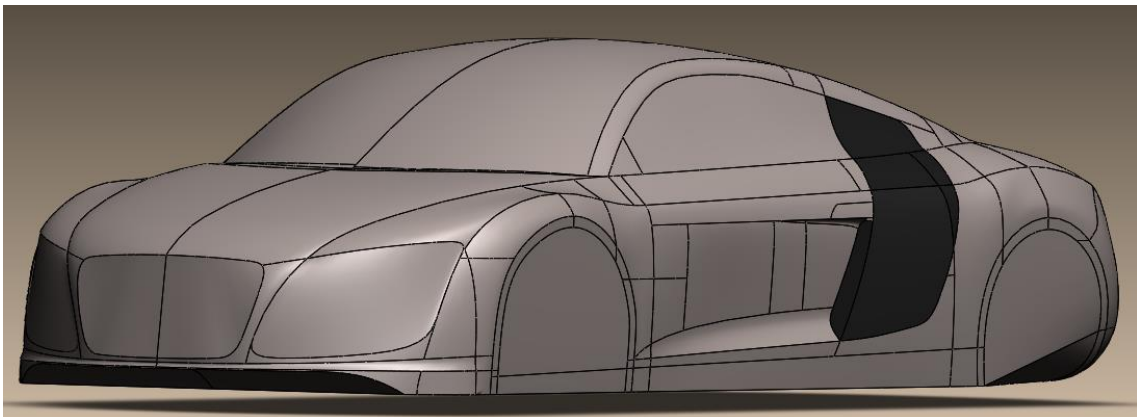


Figura 19 Modelo 3D

Para ello y para facilitar el trabajo, por la limitación de recursos que ralentizan el proceso, se efectúan las siguientes modificaciones:

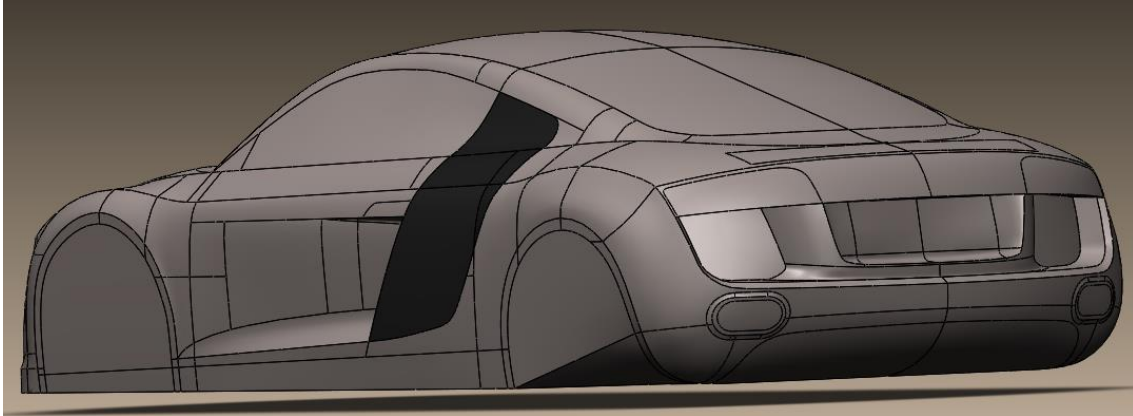
- Se crea todo con superficies por la complejidad de las geometrías.
- Simplificación de la geometría.
- Rectificar superficies pequeñas y unir las con otras más grandes.
- Eliminación de ruedas, discos, frenos, motor, interior del coche ...
- Tapar los huecos de las ruedas.
- Reemplazamiento de parrillas y todo tipo de rejillas por caras planas.
- Reemplazamiento de luces por caras planas.
- Suavizado de la zona de la ventanilla para evitar un impacto del flujo en una zona tan pequeña.
- Eliminación de huecos como el del limpiaparabrisas, la llave de la maneta, tubo de escape.
- Finalmente utilizar la función coser para fusionar y solidificar el modelo.

Al finalizar todo el proceso de eliminación de caras, remodelado del coche y simplificación de geometría el resultado es el siguiente (Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23):

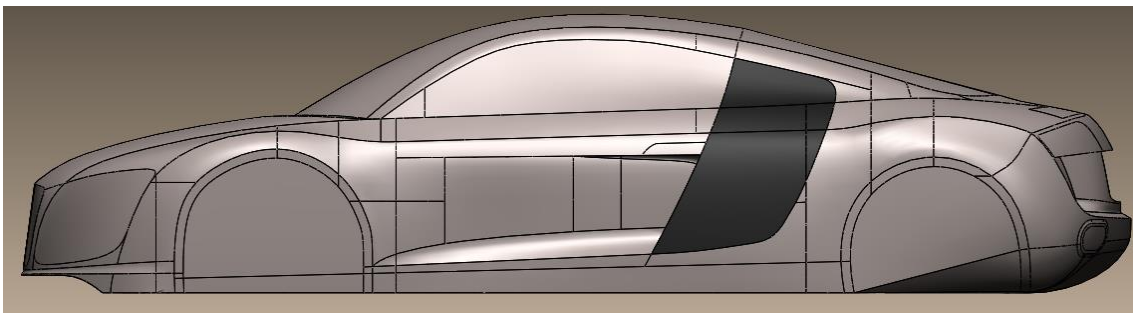


*Figura 20 Modelo 3D vista frontal-lateral*





*Figura 21 Modelo 3D vista trasera-lateral*



*Figura 22 Modelo 3D vista de perfil*



*Figura 23 Modelo 3D vista de planta del suelo*

#### 4.1. Preparación del dominio

El dominio creado que envuelve el coche, es el espacio que se estudia y por donde va a circular el flujo de aire, este no debe ser ni muy pequeño ni excesivamente grande. Una mala optimización del dominio podría desarrollar unas muy duraderas simulaciones, aun cuando el tamaño del mallado es grueso. Un dominio muy pequeño daría problemas al influenciarse el flujo cercano al coche con el que lo envuelve, llegando a un desajuste de la simulación donde puede llegar a suceder que la velocidad cambie de sentido, tal y como sucede en la Figura 24.

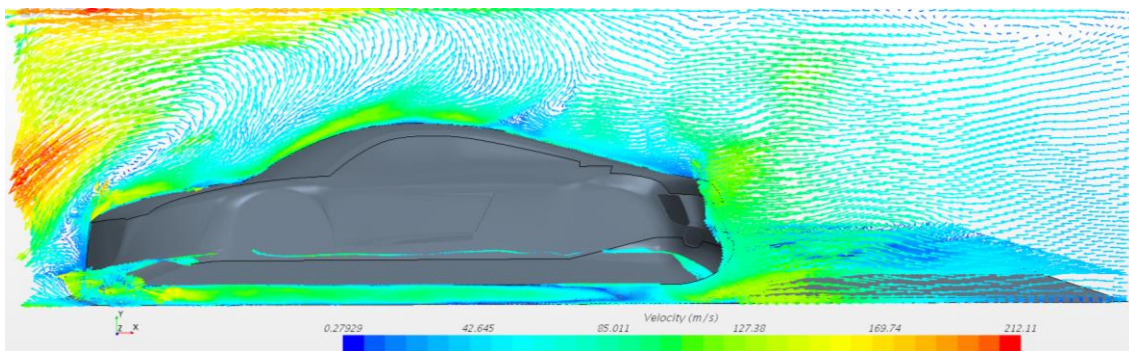


Figura 24 Flujo cercano influenciado por el envoltente

Por esa razón se deben de separar las regiones de entrada, salida y ambiente del coche, así que se dimensiona el dominio tomando un valor adimensional entre áreas. Esta relación se consigue mediante la siguiente ecuación (26). El ratio del bloque debería ser inferior a 10%

$$Ratio\ bloque = \frac{A_C}{A_T} \quad (26)$$

$A_C$ : Área frontal del coche (m<sup>2</sup>)

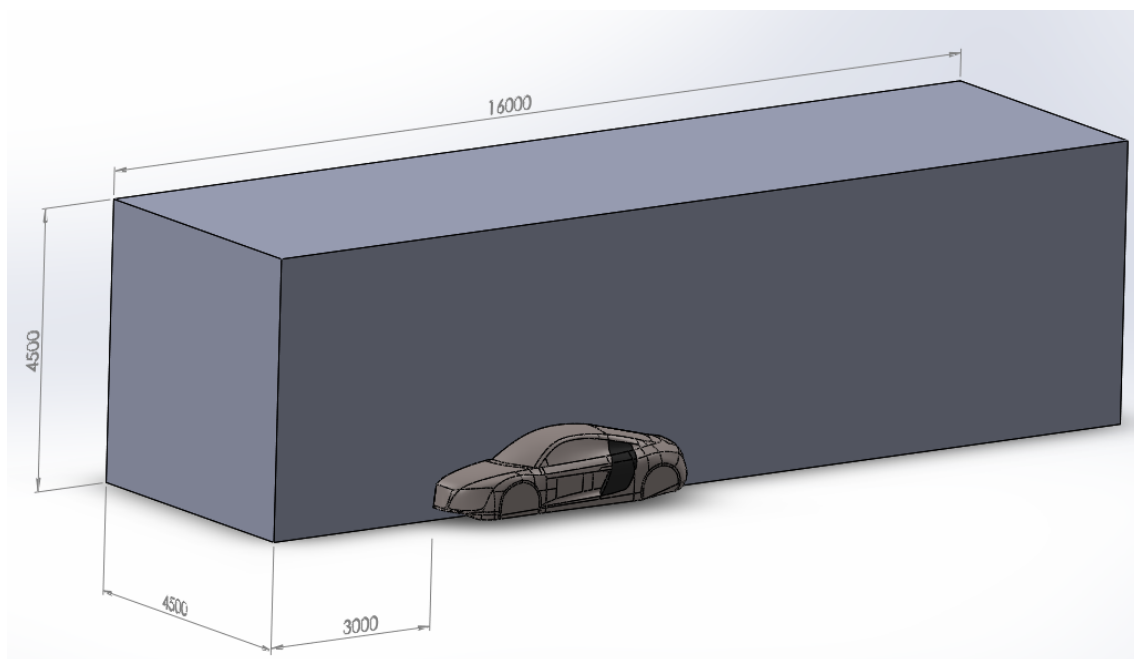
$A_T$ : Área frontal del túnel (m<sup>2</sup>)

Las dimensiones del dominio que se han considerado adecuadas son (véase también Figura 25):

- Altura: 4500 mm
- Anchura: 4500 mm

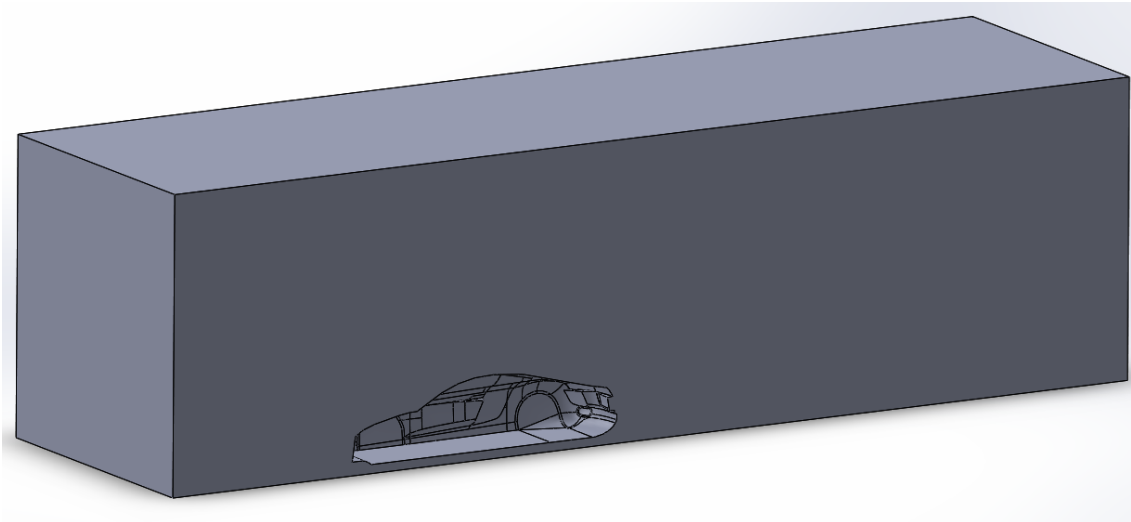
- Longitud por delante del coche (desde el parachoques delantero): 3000 mm
- Longitud por detrás del coche (desde el parachoques delantero): 16.000 m

Una vez desarrollado el dominio se ha de perfilar en su interior la geometría del modelo. Mediante un ensamblaje de ambas partes se unifican en uno, tomando referencias de posición de manera que la mitad del cuerpo queda dentro y la otra mitad queda fuera, véase Figura 25 . Este método será eficaz a la hora de restar tiempo a la simulación, obteniendo el mismo resultado, solo un 1% de error, pero con casi la mitad de celdas<sup>[4]</sup>.



*Figura 25 Unión entre el dominio y el coche con las dimensiones acotadas*

Para crear la geometría del modelo dentro del dominio se escoge una opción que hace el efecto de cavitación. Lo que sucede es que el dominio se convierte en un molde en el que todo aquello que se le haya introducido dejará su huella (véase Figura 26). De esta forma se evita tener que crear el dominio dentro del programa de CFD y tener que cargar un archivo más pesado.



*Figura 26 Cavity present in the domain of the car*

Para acabar, el dominio es guardado en otro formato, como por ejemplo STEP, que al cargarlo pregunta si se desea Importar diagnóstico. Esta herramienta permite reparar todas aquellas imperfecciones que no han sido reparadas en caso de ser necesario. De esta manera se asegura que todo es correcto. Este es entonces el archivo que es enviado al programa de CFD.

#### 4.2. Diseño de los difusores a estudiar

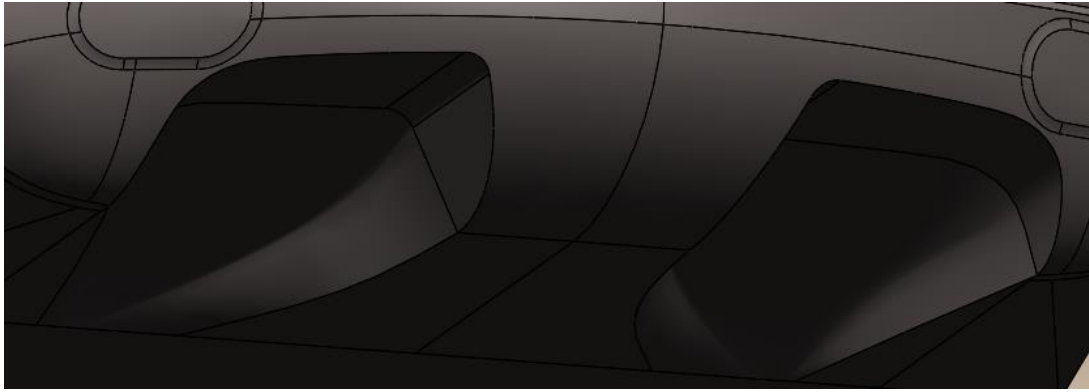
Una vez se tiene un modelo totalmente rectificado y adecuado para el estudio de CFD se diseñan diferentes tipos de difusores a raíz del modelo base, que no tiene difusor.

Como se ha comentado anteriormente, existen distintos tipos de difusores, en este proyecto se va a estudiar cuál de ellos funciona mejor, aunque los valores no sean reales a causa de la remodelación del modelo 3D.

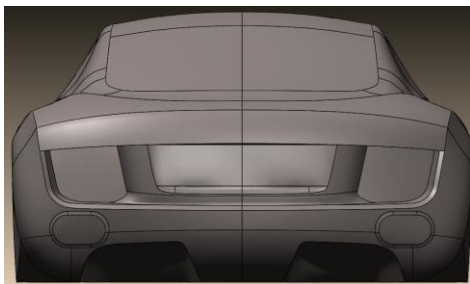
Los casos son los siguientes:

##### 4.2.1. Caso 1 (Difusor original)

Este sería una simulación del caso original. Ha sido ligeramente modificado reemplazando un escalonado por un trayecto curvado con salida totalmente paralela a la dirección del flujo de aire de entrada (véase Figura 27, Figura 28 y Figura 29).



*Figura 27 Difusor original*



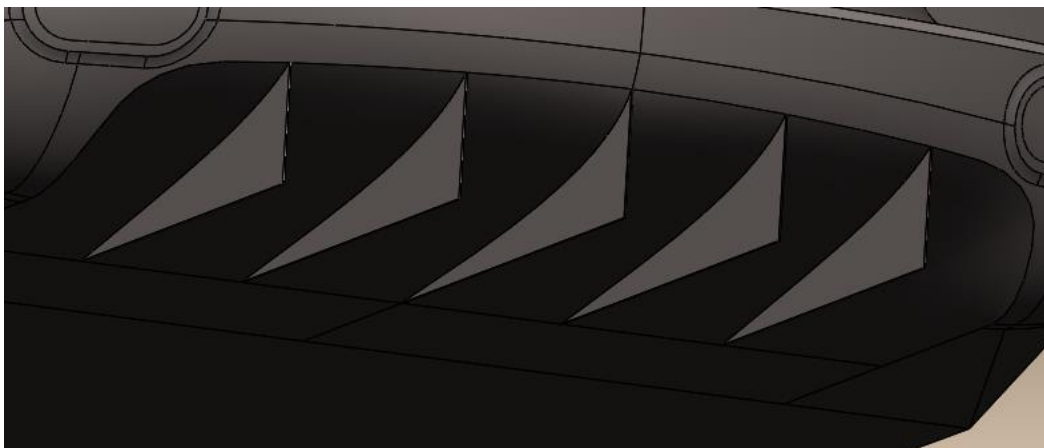
*Figura 28 Vista trasera del difusor original*



*Figura 29 Vista en planta del difusor original*

#### 4.2.2. Caso 2 (Aletas rectas)

En este caso se desea ver si las aletas reordenan el flujo turbulento sin dejarlo esparcirse por el difusor, tal y como lo hacen los alerones. Con este método se desea que se esparza el flujo una vez salga del difusor, creando un pico de presión en la salida y no en su transcurso (véase Figura 30, Figura 31 y Figura 32).



*Figura 30 Difusor de aletas rectas*

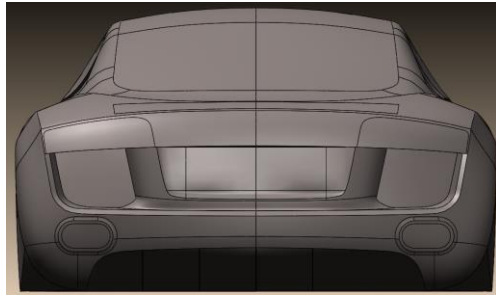


Figura 31 Vista trasera del difusor de aletas rectas

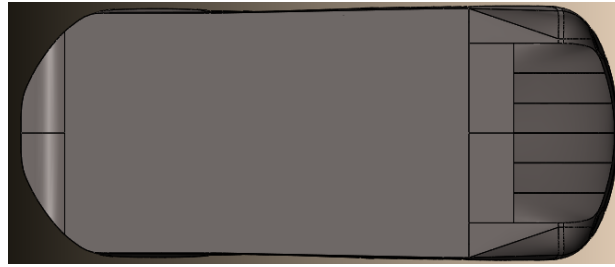


Figura 32 Vista en planta del difusor de aletas rectas

#### 4.2.3. Caso 3 (Aletas curvadas)

En el tercer caso, se modifican las aletas del caso 2 reduciendo la entrada de aire formándose así unas curvas en su transcurso, que al igual que en el caso 2 ayudan a no provocar mayores turbulencias dentro de la trayectoria bajo el difusor. (véase Figura 33, Figura 34, Figura 35)

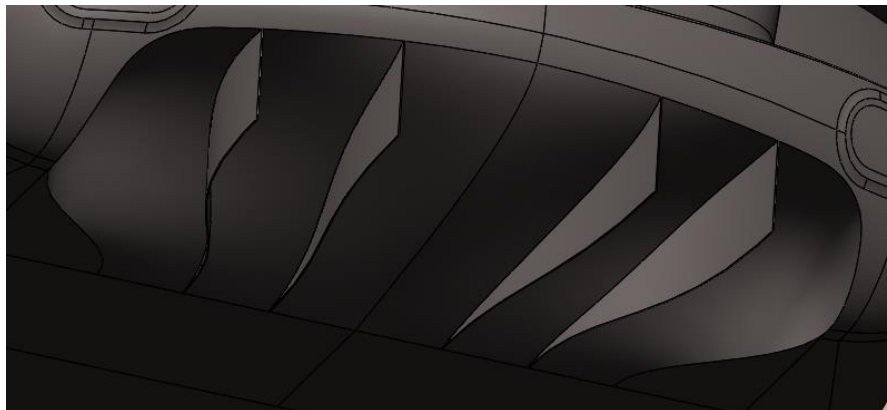


Figura 33 Difusor de aletas curvadas

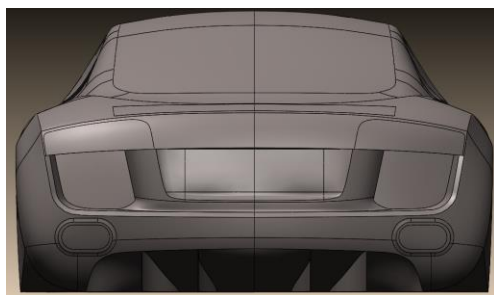


Figura 34 Vista trasera del difusor de aletas curvadas

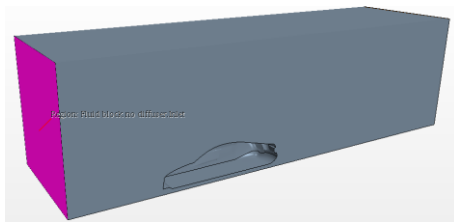


Figura 35 Vista en planta del difusor de aletas curvadas

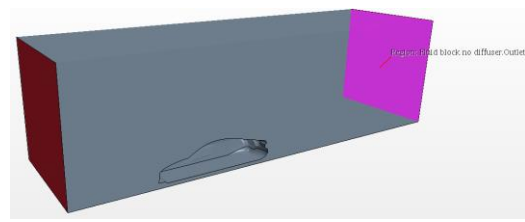
## 5. CFD

Para este proyecto se utiliza Star CCM+ como programa de CFD, en el cual hay que seguir una serie de pasos, tal y como se van a seguir a continuación.

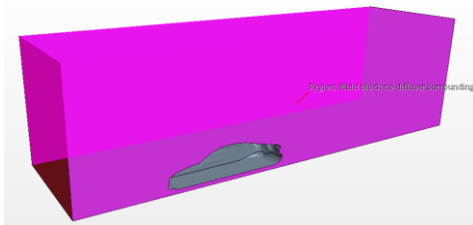
Primero se importa el modelo 3D, del caso sin difusor, como un volumen. Se realiza primeramente con este caso porque los resultados convergen con mayor rapidez evitando posibles turbulencias de un mal diseño. Seguidamente este volumen es dividido en distintas superficies (Faces) que estarán englobadas por una sola región (Region). A continuación, se nombran las superficies (véase de la Figura 36 hasta la Figura 42).



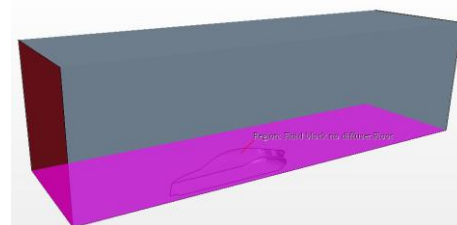
*Figura 36 Inlet*



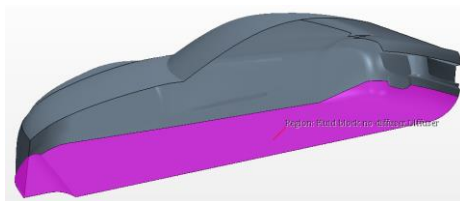
*Figura 37 Outlet*



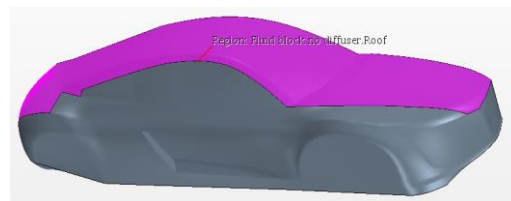
*Figura 38 Surrounding*



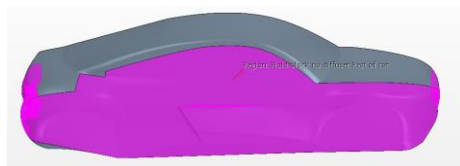
*Figura 39 Floor*



*Figura 40 Diffuser*



*Figura 41 Roof*



*Figura 42 Rest of car*



Las características de las superficies (boundaries) se pueden especificar o usar los valores designados en general, como se quiere optimizar los recursos se especifican todas exceptuando la entrada (Inlet), la salida (Outlet) y la que se considera como el exterior (Surrounding).

Es entonces cuando se configura el mallado y la física del flujo, teniendo en cuenta una serie de suposiciones.

- Steady state.
- No existe ninguna interacción con la energía térmica.
- Velocidad de entrada: 55,56 m/s o lo que es lo mismo 200 km/h.

La elección de estas suposiciones sirve para delimitar el alcance de la simulación, las dos primeras facilitan enormemente la adquisición de datos reduciendo el tiempo de computación. La elección de la velocidad es para tener mayor visibilidad de las turbulencias y las estelas generadas.

Para el caso de la física se tienen varios factores que van a ser fijos para todos los modelos turbulentos, las razones se especifican a continuación.

### 5.1. Physic conditions

En el transcurso de la mejor estrategia, primeramente, se han de conocer todas las condiciones físicas posibles antes de tomar una decisión. Posteriormente algunas de ellas pueden ser seleccionadas mediante ecuaciones anteriormente descritas (apartados 3.2 y 3.5), ayudando a tomar una elección y/o a simplificar la simulación sin que ello provoque un gran error.

Por ese motivo se van a explicar en cada paso todas las elecciones posibles y a posteriori la elección seleccionada en **negrita**, las cuales forman la estrategia tomada.

#### Modelo de espacio

- Axisymmetric Model
- Shell Three-Dimensional Model
- Two-Dimensional Model
- **Three-Dimensional Model**



Los modelos de espacio al ser ya conocidos se dan por sentado el conocimiento de estos. La razón por la que se elige el modelo en 3D es porque no se tiene ningún objeto simétrico respecto una rotación (Axisimétrico), ni se trata de estudiar una capa fina del revestimiento del coche (Revestimiento Tres dimensiones), y evidentemente el estudio no es en dos dimensiones.

### Tiempo

- Explicit Unsteady

Modelo que discretiza una ecuación diferencial en la que solo existe una variable desconocida en el siguiente salto de tiempo.

- Implicit Unsteady

Modelo que discretiza una ecuación diferencial en la que existen varias variables desconocidas en el siguiente salto de tiempo.

- PISO Unsteady

Modelo que calcula la presión-velocidad de las ecuaciones de Navier-Stokes sin iteraciones y con grandes saltos de tiempo. Sus siglas son Pressure-Implicit with Splitting of Operators.

- Harmonic Balance

Modelo en el que la solución se repite mediante una frecuencia.

- **Steady**

Modelo en el que las variables que definen el comportamiento del sistema no varían en el tiempo.

Un buen estudio hubiera sido si se hubiera representado como varia el flujo de aire entorno el coche cuando este aumenta su velocidad desde 0 hasta 200 km/h, pero, la falta de recursos y tiempo hacen que este proyecto sea limitado a estudiar el caso en estado permanente a 200 km/h.

## Material

- **Gas**
- Liquid
- Solid
- Eulerian Multiphase
- Multi-Component Gas
- Multi-Component Liquid
- Multi-Part Solid

El material que fluye entorno el coche es aire, por lo tanto, la elección es gas.

## Flujo

- **Segregated**  
Modelo para flujos incompresibles o medio compresibles. También se suelen utilizar cuando a pesar de ser compresibles existe una carencia de recursos pudiendo reducirse entre el doble y el cuádruple comparado con el coupled.
- **Coupled**  
Modelo para flujos compresibles, problemas de convección natural o con grandes fuerzas.

Anteriormente se ha calculado el número adimensional de Mach, con él se ha obtenido un valor por debajo de 0,3 que permite comprender el estudio a densidad constante o, dicho de otra forma, con un flujo incompresible.

## Ecuación de estado

- **Constant Density**
- **Ideal Gas**  
Modelo que expresa la densidad como una función de temperatura y presión.



- Polinomial Density

Modelo que expresa la densidad en una ecuación de forma polinomial.

- Real Gas

Modelo que tiene en cuenta el comportamiento no ideal del gas, como la compresibilidad, capacidad específica de calor variable, fuerzas van der Waals y efectos termodinámicos no equilibrados.

- User Defined EOS

### Energía

- Segrated Fluid Enthalpy

Modelo que resuelve la ecuación de energía total tomando entalpía térmica química como la variable solucionada.

- **Segrated Fluid Isothermal**

Modelo que mantiene la temperatura constante.

- Segrated Fluid Temperature

Modelo que resuelve la ecuación de energía total tomando la temperatura como la variable solucionada

La temperatura no es un factor a estudiar en este proyecto, por lo que lo dejamos como una constante.

### Régimen viscoso

- Inviscid

Es una idealización que resulta de despreciar los efectos viscosos.

- Laminar

Modelo que supone un flujo laminar con bajos Reynolds.

- **Turbulent**

Modelo que supone un flujo turbulento con altos Reynolds.

En el apartado 3.5. se calcula en que momento la capa límite se convertía en turbulenta, al obtener un valor tan pequeño se considera todo el flujo turbulento.

#### Y+ treatment

- High y+

Modelos de flujo con un Reynolds en régimen totalmente turbulento. Se calcula cuando el centroide de la cara está en la zona logarítmica de la capa límite, con y+ mayor de 30.

- Low y+

Modelos de flujo con un Reynolds en régimen totalmente laminar. Se calcula cuando el centroide de la cara está en la zona viscosa de la capa límite, y por lo tanto y+ no es mayor de 1.

- **All y+ Wall treatment**

Modelo de flujo más realista en el que existen tanto flujos laminares como turbulentos. Se calcula cuando el centroide de la cara está en la zona buffer de la capa límite, donde se obtiene valores muy similares para low-Reynolds y high-Reynolds.

En este proyecto yacen ambas regiones de Reynolds, tal y como se ha visto en el apartado 3.5 con un flujo laminar de 138 mm de longitud, obteniendo en el resto de la superficie plana (4262 mm) flujo turbulento. Por lo tanto, se considera All y+ treatment como el modelo adecuado, aunque mayormente predomina los altos Reynolds con

turbulencias y se podría seleccionar también el modelo High y+ pero se hubieran despreciado la viscosidad laminar a través de las superficies del coche.

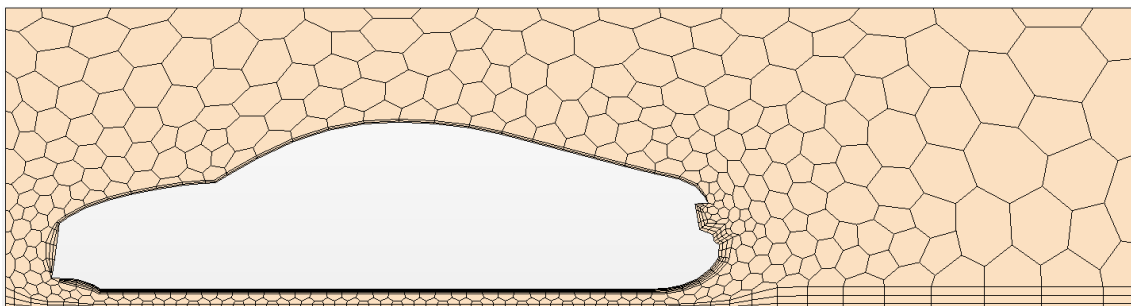
#### 5.1.1. Análisis del modelo turbulento

A partir de este punto, queda conocer cuál es la configuración de modelo turbulento que funciona mejor, es por ello que con un mallado con el que se hayan obtenido resultados coherentes, y que a la vez no sea muy pesado para no perder mucho tiempo, se elabora un análisis sobre los modelos turbulentos.

El tiempo requerido para cada simulación es de entorno 1 o 2 minutos. Tanto este análisis del modelo turbulento como el grid independency pueden al principio parecer una pérdida de tiempo con mallados tan pequeños, pero la cuestión es que este método evita perder horas, sino días, intentado converger simulaciones que al final nunca llegan a converger. Este paso requiriere poco tiempo y ayuda a dirigir la simulación hacia el estudio más rápido y eficaz posible.

El procedimiento de cada estudio se basa en configurar la física del modelo y simular hasta que los residuos sean completamente constantes. Una vez suceda se parará la simulación y se recogerán los datos de cada uno de ellos.

Se configura un mallado (véase Figura 43) que consta de 18.640 celdas, con un tamaño de celda mínimo y máximo de 7.5 cm y 75 cm respectivamente, con el que se desarrolla cada modelo turbulento para ser equiparables.



*Figura 43 Mallada para el análisis del modelo turbulento*

El análisis se basa en comparar la convergencia de los residuos y resultados de los casos físicos siguientes:

## - K-Epsilon standard

K-Epsilon es un modelo turbulento de dos ecuaciones (véase los anexos para ver las ecuaciones):  $k$  (turbulencia de energía cinética) y  $\epsilon$  (ratio de disipación de la  $k$ ), que simula lejos de las paredes de la geometría, evitando así grandes o fuertes turbulencias causadas por altos gradiente de presión, chorros de flujo o cambios bruscos del flujo. Se suele utilizar para geometrías complejas donde se requieren extraer datos lejos de la geometría. Como ventajas se obtiene una buena convergencia con un consumo bajo de recursos.

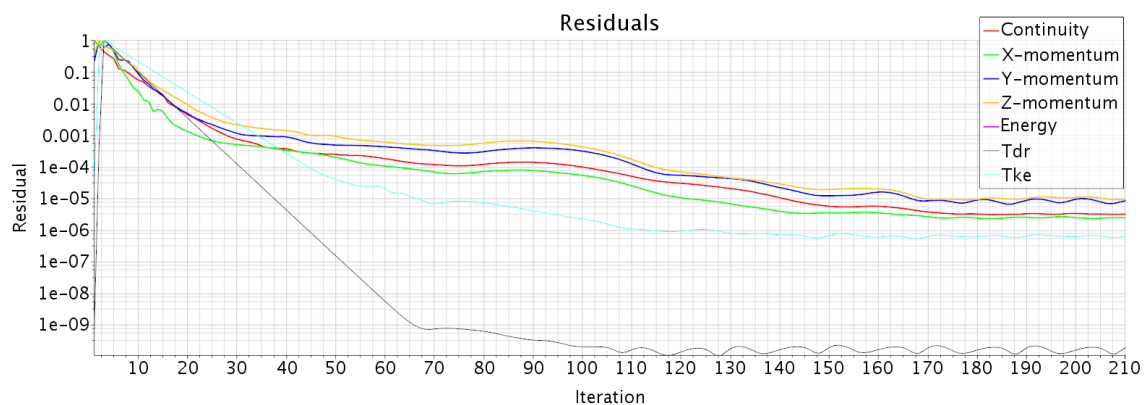


Figura 44 Residuos con  $k$ -Epsilon Standard

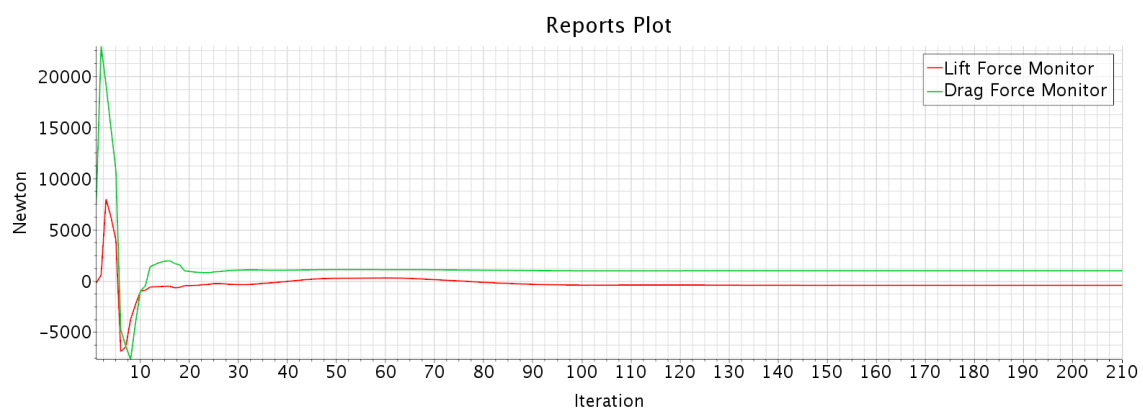


Figura 45 Resultado de las fuerzas con  $k$ -Epsilon Standard

## - K-Epsilon two layers

k-Epsilon two layers (véase los anexos para ver las ecuaciones) se distingue del Standard por incorporar un enfoque a la subcapa viscosa.

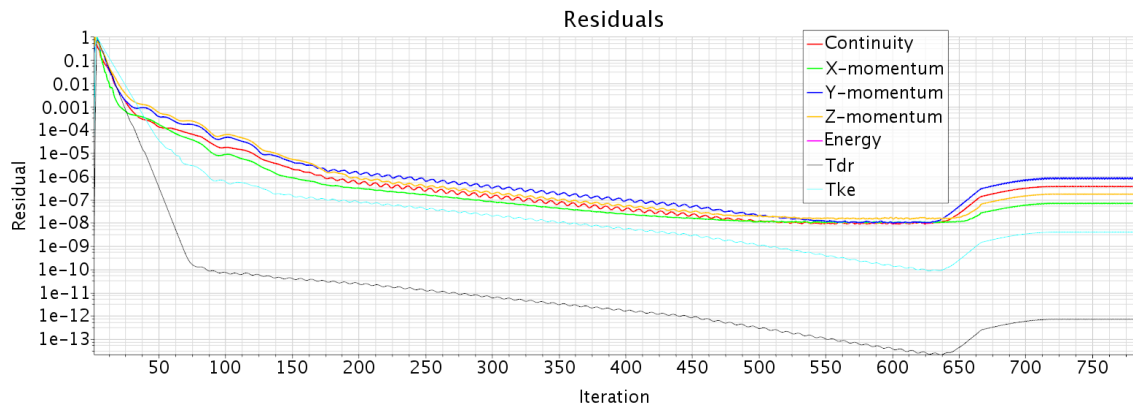


Figura 46 Residuos con k-Epsilon two layers

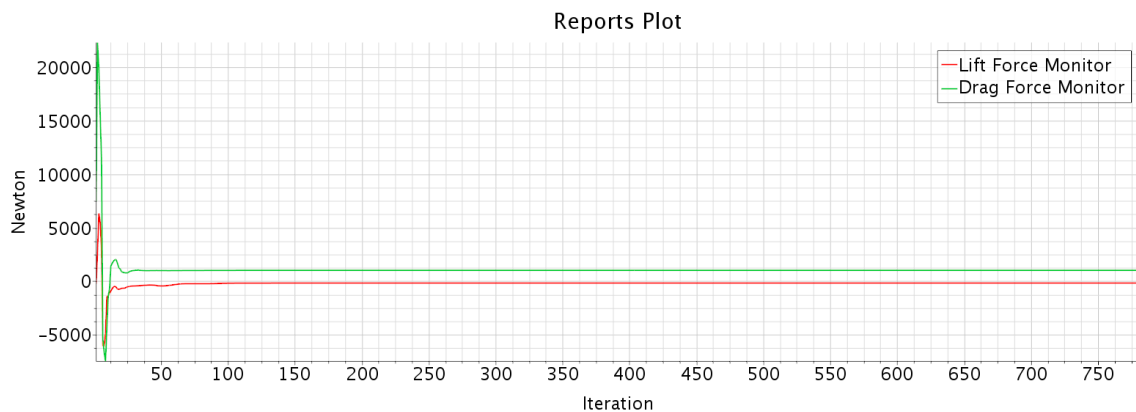


Figura 47 Resultado de las fuerzas con k-Epsilon two layers

## - K-Omega standard

K-Omega es un modelo turbulento de dos ecuaciones (véase los anexos para ver las ecuaciones):  $k$  y  $\omega$  (ratio específico de la  $k$ ) parecido al k-Epsilon, donde se le dan más importancia a las turbulencias que suceden cerca de las paredes de la geometría, esto es posible gracias a las funciones de pared ( $Y^+$ ). Se requieren unas suposiciones acertadas ya que es muy dependiente de estas. Una mala suposición podría dificultar mucho su convergencia. Sus ventajas son los puntos

negativos del k-Epsilon: altos gradientes de presión, grandes chorros de flujo o cambios bruscos del flujo.

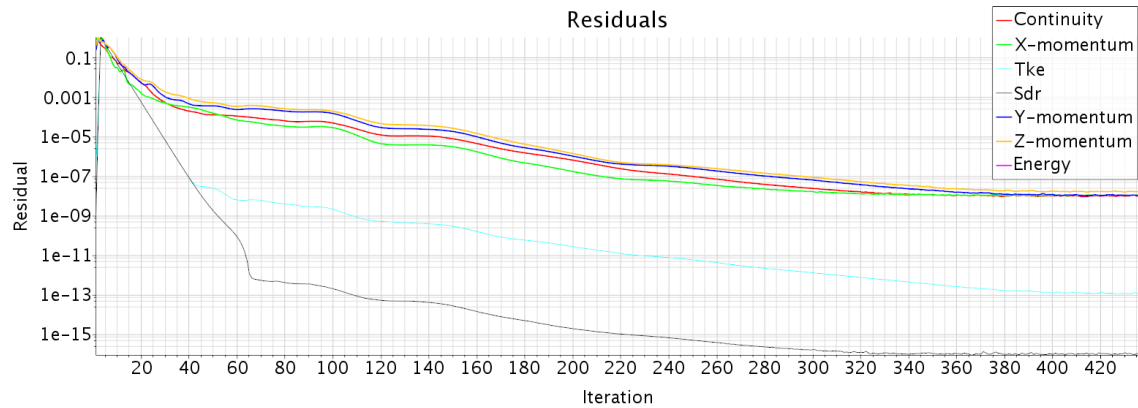


Figura 48 Residuos con k-Omega Standard

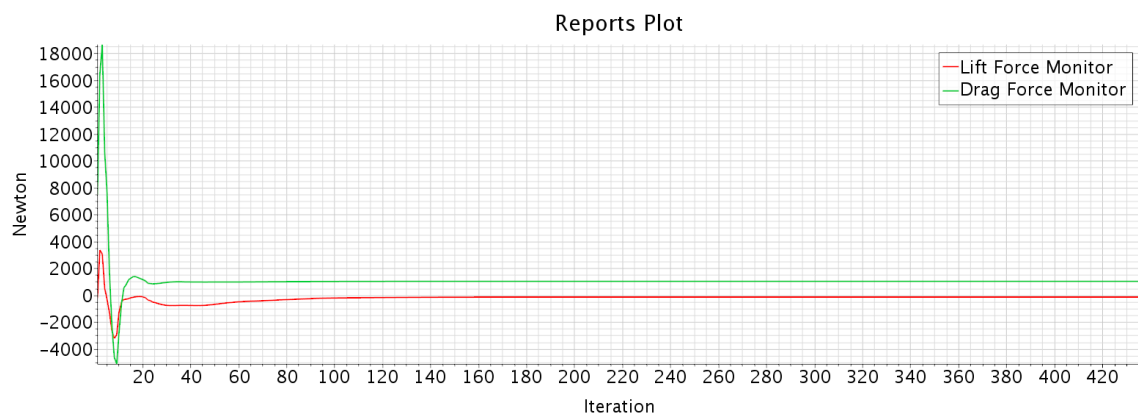


Figura 49 Resultado de las fuerzas con k-Omega Standard

#### - K-Omega (SST)

K-Omega (Menter's Shear Stress Transport) se distingue del Standard por combinar las características del Standard con las del k-Epsilon (véase los anexos para ver las ecuaciones). El modelo funciona utilizando k-Epsilon en las zonas lejanas a la geometría y k-Omega a las cercanas. Esta metodología elimina debilidades de ambos modelos.



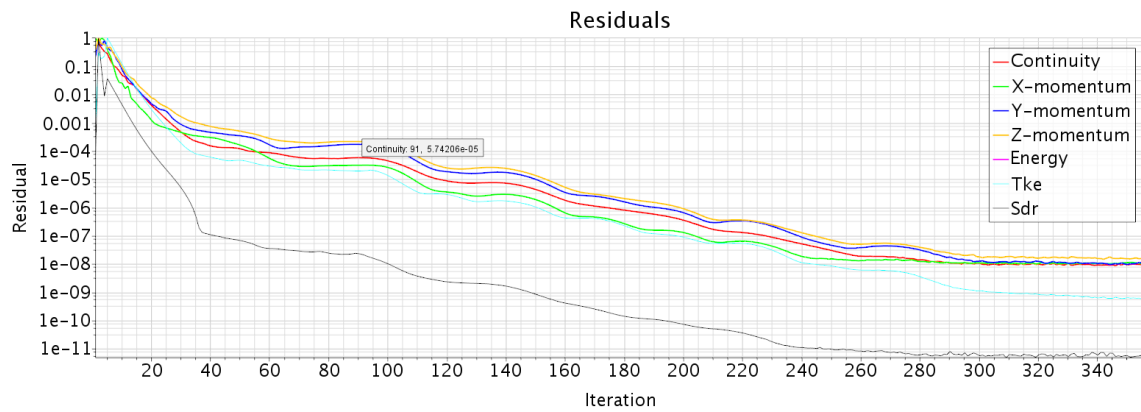


Figura 50 Residuos con k-Omega (SST)

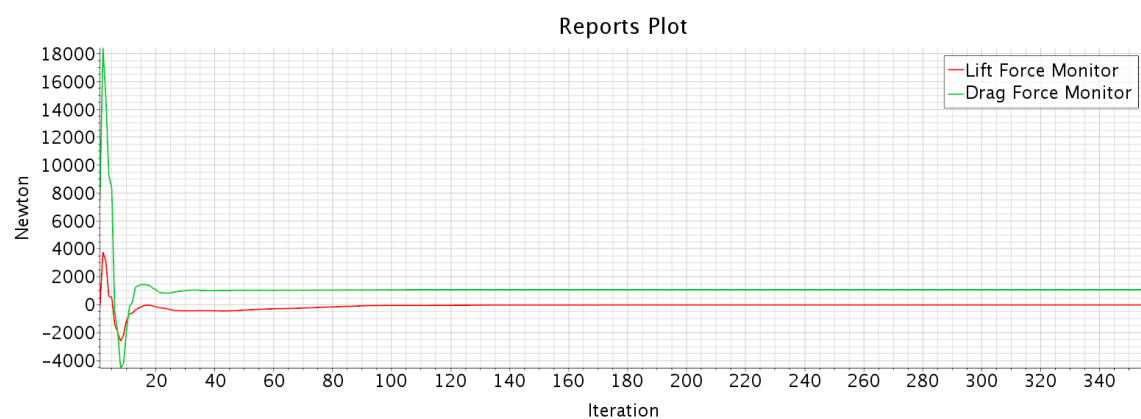


Figura 51 Resultado de las fuerzas con k-Omega (SST)

#### - Spalart Allmaras

Spalart Allmaras es un modelo turbulento de una ecuación (véase los anexos para ver las ecuaciones) para una viscosidad cinemática no amortiguada que suele ser utilizada en aplicaciones aerodinámicas. Trabaja con bajos Reynolds acercándose a las paredes de la geometría. Como ventaja, se obtienen unos resultados robustos y estable seguida de una buena convergencia.

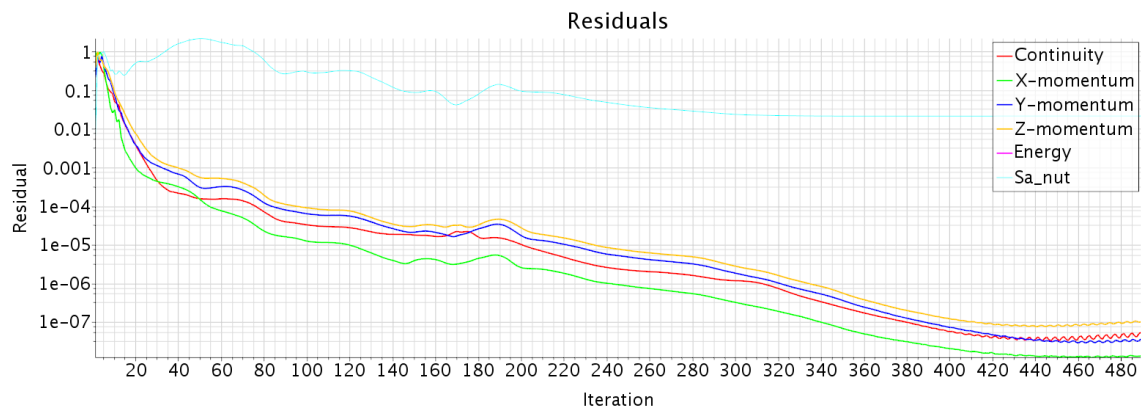


Figura 52 Residuos con Spalart Allmaras

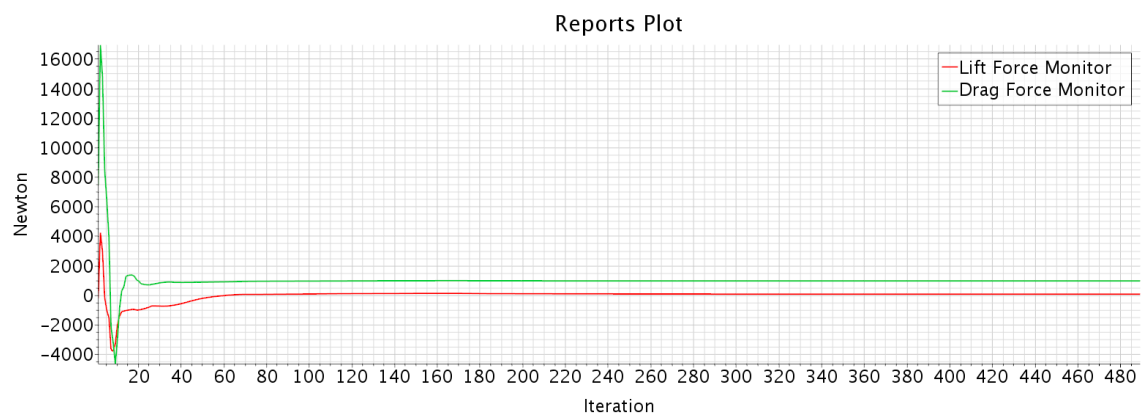


Figura 53 Resultado de las fuerzas con Spalart Allmaras

#### - Reynolds stress equation

Reynolds stress equation (véase los anexos para ver las ecuaciones) es un modelo que no utiliza la hipótesis eddy-viscosity (la viscosidad turbulenta en los vórtices) como todos los anteriores, la cual conlleva algunas deficiencias en flujos complejos. De modo que en este modelo se ha deseado mejorar tales aspectos y obtener una mejor exactitud.

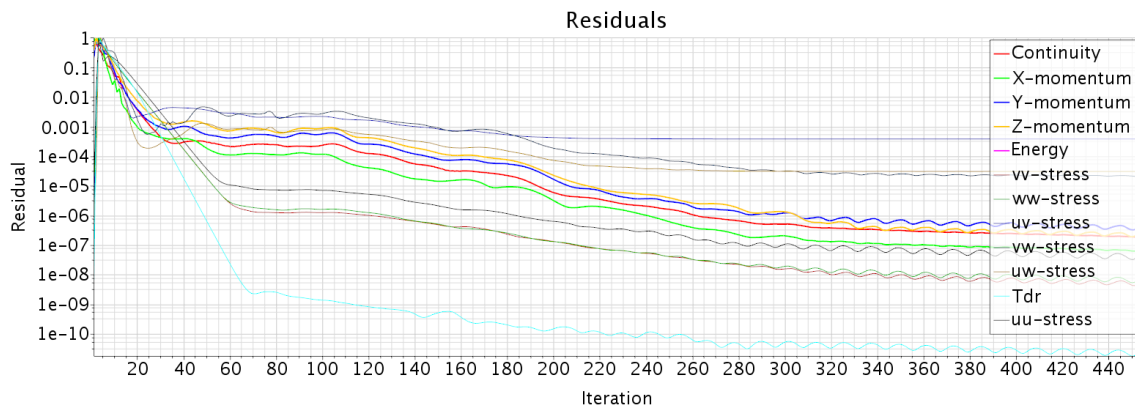


Figura 54 Residuos con Reynolds stress equation

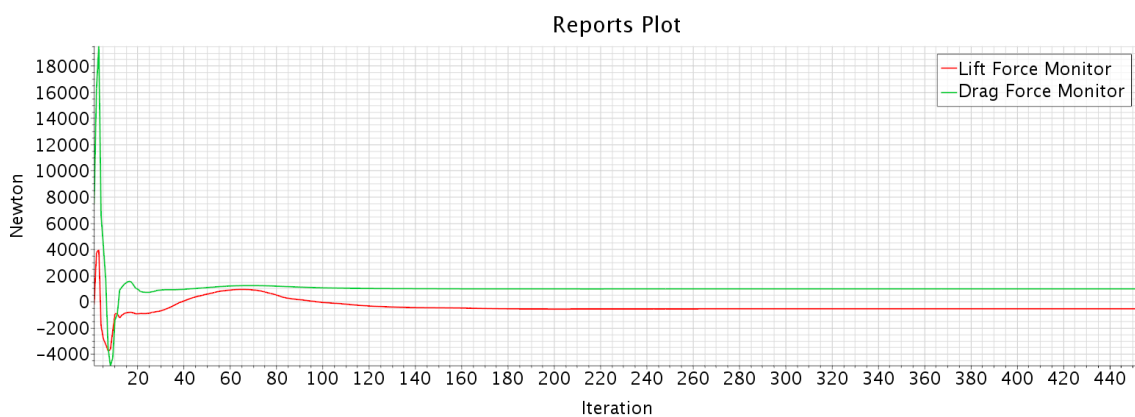


Figura 55 Resultado de las fuerzas con Reynolds stress equation

Referente a lo anteriormente expuesto (Figura 44 - Figura 55) se concluye que en todos los casos se observa que los gráficos de fuerzas son aparentemente iguales, convergiendo muy pronto y resultando constantes en pocas iteraciones. Mientras que los residuos de cada una de ellas han sido bastante diferentes, distinguiendo sobre todo tres casos, los cuales ha logrado un mejor resultado, k-Epsilon two layers, k-Omega (SST) y k-Omega Standard. Entre estos tres últimos se descarta k-Epsilon por acabar después del último repecho con residuos más grandes que los otros (entre  $1 \cdot 10^{-6}$  y  $1 \cdot 10^{-7}$ ) y con 300 iteraciones de más.

Finalmente, entre estos dos métodos está muy igualado por lo que daría igual cuál de ellos elegir, ambos llegan a  $1 \cdot 10^{-8}$  o están muy cercanos y el número de iteraciones en el que convergen es el mismo ( $\sim 320$  iteraciones). De modo que como la k-Omega Standard logra un valor residual menor en Sdr (Specific dissipation rate) y Tke (Turbulence kinetic energy), se acaba escogiendo como el modelo turbulento.

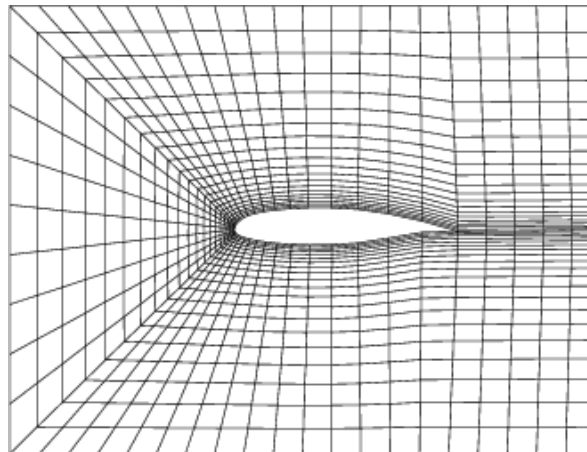
## 5.2. Mesh conditions

De la misma forma que en el anterior apartado se definirán los distintos tipos de modelos que engloban un mallado volumétrico y los escogidos son remarcados en **negrita**.

Para comenzar existen tres formas de mallar.

- Mallas estructuradas (Structured Meshing)

Una malla estructurada tiene la peculiaridad de definirse como un conjunto de celdas ordenadas formando una matriz de dos o tres dimensiones (véase Figura 56), de esta forma el acceso a las celdas adyacentes resulta muy fácil y rápido. La formación de esta estructura no permite que se desarrollen cualquier tipo de malla no estructurada como hexaedros, tetraedros y poliedros.



*Figura 56 Ejemplo de malla estructurada [17]*

- Mallas no estructuradas (Unstructured Meshing)

Una malla no estructurada tiene la peculiaridad de no definirse de una forma ordenada (véase Figura 57). Este tipo de mallas ofrecen un gran abanico de ventajas, tales como, gran flexibilidad para adaptarse a geometrías complejas, el tiempo de generación de malla es menor que con una estructurada, se puede elegir el tipo de refinamiento que se desee, para ello se han de asignar unos adecuados valores a las variables para obtener una adecuada calidad de malla.

Por el contrario, las no estructuradas consumen mucha más memoria que la estructurada.

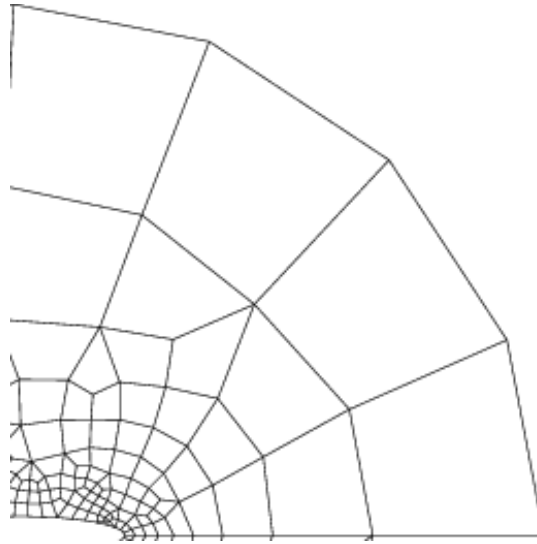


Figura 57 Ejemplo de malla no estructurada [18]

#### - Mallas híbridas

Las mallas híbridas son una mezcla de ambas estructuras (véase Figura 58), formándose toda una capa de malla estructurada alrededor de la geometría con un cierto espesor, mientras que el resto del mallado se forma con la malla no estructurada obteniendo así las ventajas de ambos.

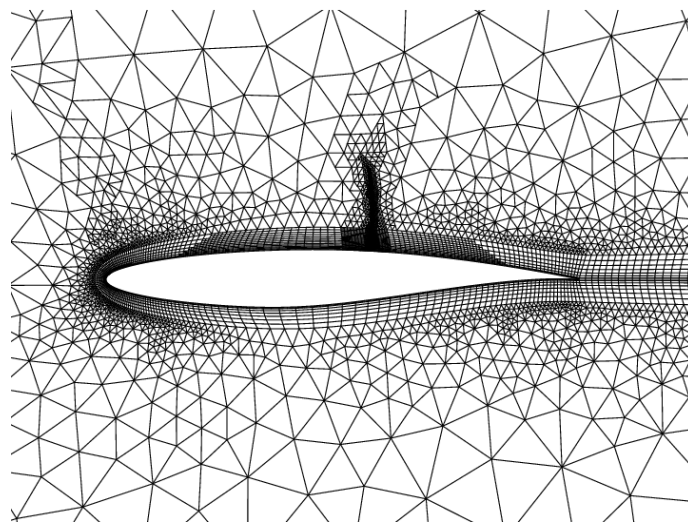


Figura 58 Ejemplo de malla híbrida [19]

Seguidamente se generan las mallas superficiales las cuales son una referencia para el mallado volumétrico, de estas existen dos disponibles.

- **Surface Wrapper**

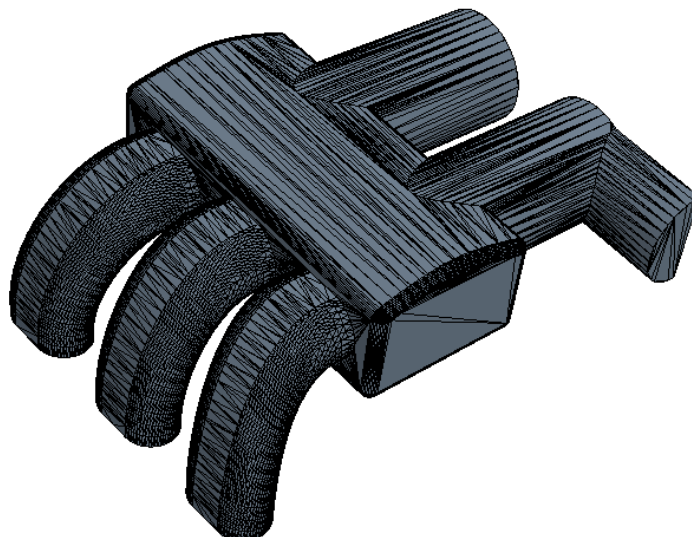
Crea una superficie envolvente inicial cerrada y múltiple de una geometría compleja. Se suele utilizar cuando el CAD es de baja calidad (con agujeros, desajustes) o tiene una geometría muy compleja, de esta manera se asegura que queda un mallado hermético y adecuado para CFD (véase Figura 59). A veces se utilizan ambos tipos de superficies para mejorar dicha calidad.



*Figura 59 Surface wrapper [20]*

- **Surface Remesher**

Crea una superficie discretizada inicial que ya es adecuada para CFD en la que triangula la superficie según el refinamiento escogido, mejorando la calidad de la geometría y optimizándolo para la futura generación del mallado volumétrico (véase Figura 60).



*Figura 60 Surface remesher [21]*

Finalmente se puede proceder a seleccionar una de las cuatro mallas volumétricas disponibles.

- Advancing Layer Mesher

Modelo que genera 2 tipos de malla (véase Figura 61), una en la que yace en toda la superficie de la geometría (representado de color azul), ya sea interior o exterior. Esta está conformada por capas de prismas formando una base igual a la del elemento volumétrico de la segunda malla. La segunda malla (color rosa) pueden ser elementos volumétricos hexagonales, tetraédricos o poliédricos, los cuales rellenan todo aquello que no esté adherido a las paredes, los cuales proporcionan una mejor adquisición de datos. Sin embargo, la malla por capas (azul) no puede reducir su grosor, sino que elimina los elementos volumétricos rellenos (rosa) disminuyendo la calidad del volumen general en zonas estrechas.



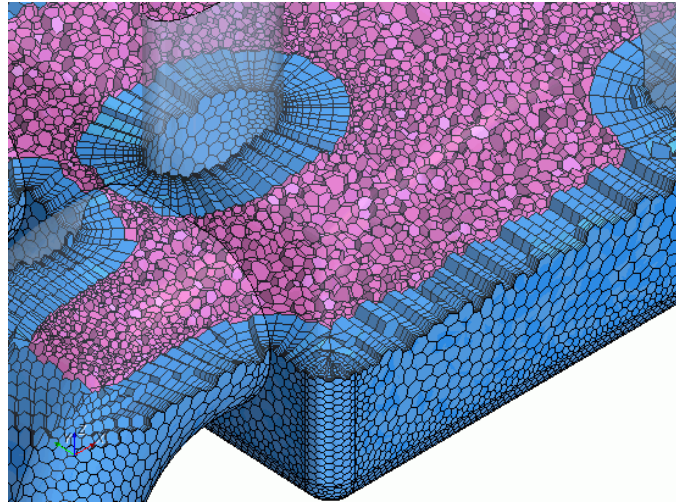


Figura 61 Advancing layer mesher [22]

- Trimmed cell (Hexaedros)

Este tipo de mallado ofrece una robustez y un método eficiente de producir una alta calidad para geometrías simples y complejas generando a base de hexaedros que, en caso de ser necesario, son recortados (véase Figura 62).

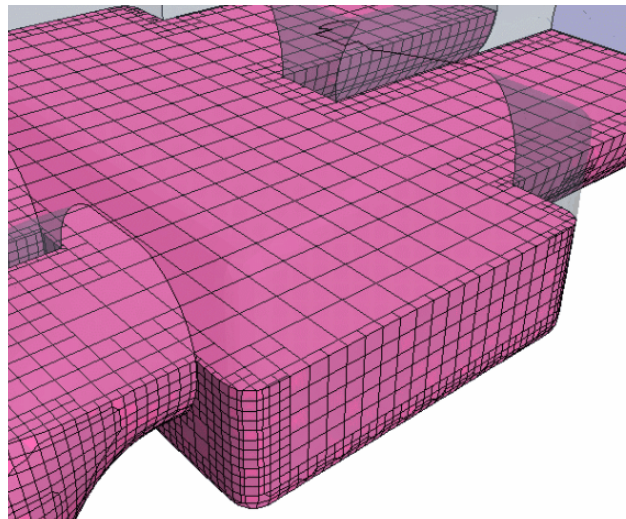
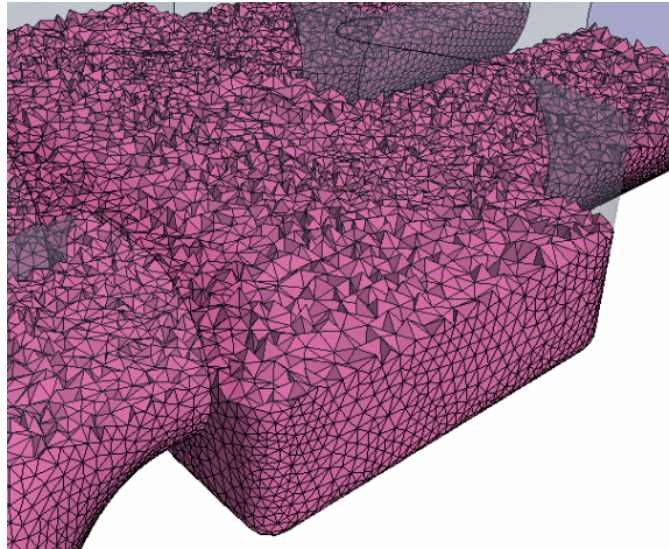


Figura 62 Trimmed mesher [23]

- Mallado tetraédrico

El mallado tetraédrico aporta una eficiente y simple solución para problemas complejos de generación de malla. Este mallado se forma a partir de la triangulación formada por el mallado superficial, por esa razón se ha de generar una buena calidad en la malla superficial (véase Figura 63).

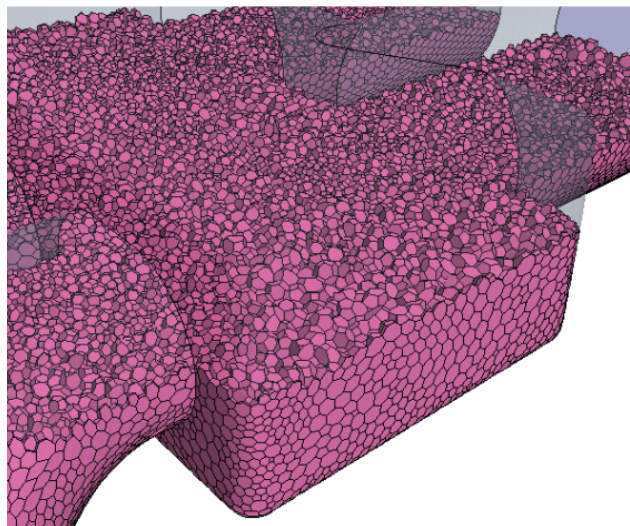




*Figura 63 Mallado tetraédrico* [24]

- **Mallado Poliédrico**

El mallado poliédrico aporta una solución equilibrada para problemas complejos de generación de malla. La formación de este poliedro pasa a través de una primera generación de tetraedros que posteriormente son conformados en poliedros. Estos suelen tener alrededor de 14 caras por celda (véase Figura 64).



*Figura 64 Mallado poliédrico* [25]

La comparación entre los tres últimos se basa en un artículo<sup>[5]</sup> en el que han sido estudiados. Se excluye el primero por su dificultad a la hora de controlar el grosor.

El estudio de dicho artículo se basa en un conducto rectangular con un ligero desnivel al final en el que se hace pasar aire a cierta velocidad y se estudia la presión en cada punto. En él se han generado una serie de gráficas y tablas comparativas (véase Figura 66, Figura 67, Figura 68 y Figura 69) que serán válidas para sacar las conclusiones de este proyecto y decantarse por uno de ellos.

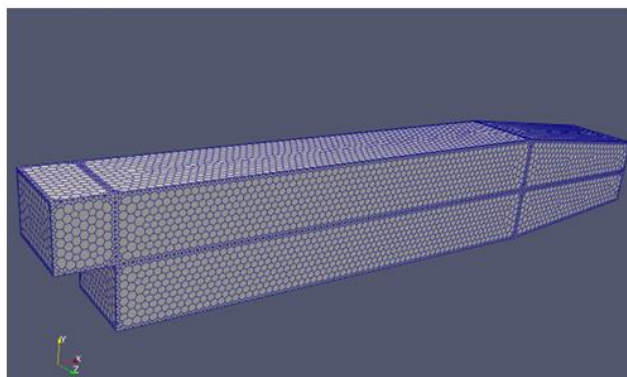


Figura 65 Geometría estudiada por el artículo de referencia [26]

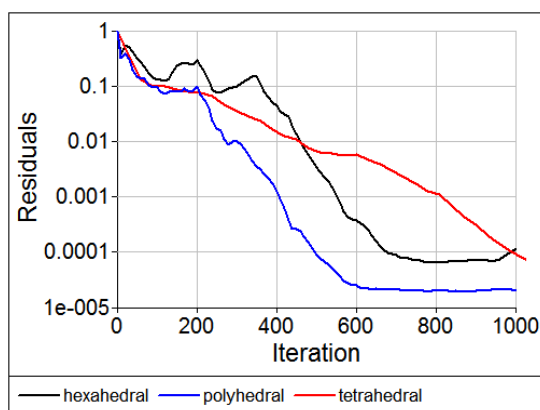


Figura 66 Comparación de los residuos [27]

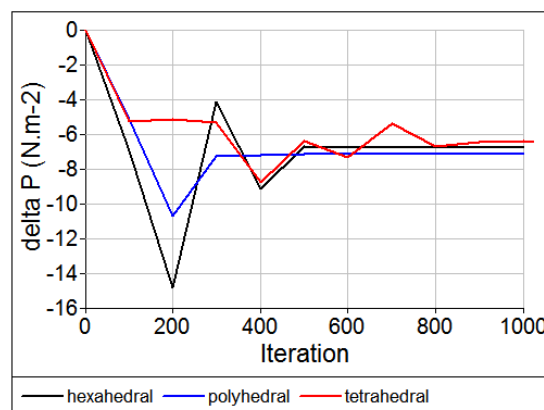


Figura 67 Comparación de los resultados [28]

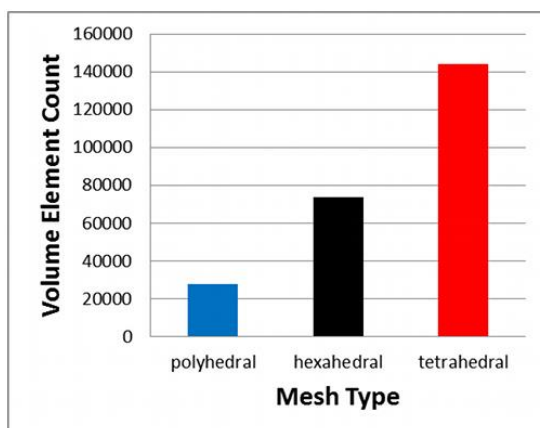


Figura 68 Comparación del número de celdas [29]

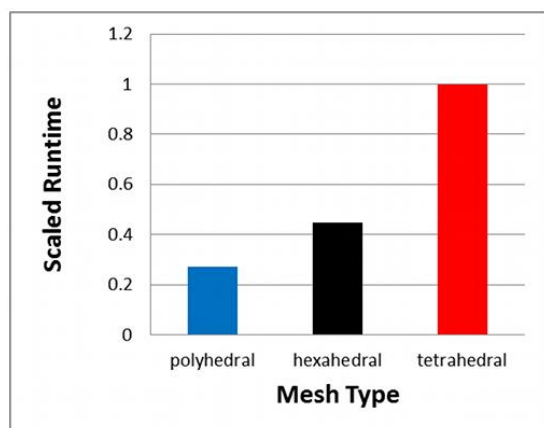


Figura 69 Comparación del tiempo [30]

Como conclusión del estudio, se obtiene:

- Mayor rapidez de convergencia de resultados y residuos: **Poliedro**

El mínimo valor admisible para alcanzar una convergencia de residuos es de  $1 \cdot 10^{-4}$ , en la Figura 66 el poliedro no solo lo consigue 200 iteraciones antes que el segundo, sino que además continúa menguando el valor de los residuos hasta casi los  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Por otra parte, en la Figura 67 los resultados dejan de fluctuar a la iteración 400, mientras que el segundo en hacerlo tarda entorno 100 iteraciones de más.

- Menor número de celdas necesarias para conformar la geometría: **Poliedro**

Como se ha mencionado anteriormente, el poliedro está confeccionado a partir del tetraedro, es entonces lógico que este tenga un número menor de celdas, en este caso (Figura 68) la variación son de entorno un 60% y un 80% menos entre el hexaedro y tetraedro respectivamente.

- Menor tiempo necesario para la obtención de buenos resultados: **Poliedro**

En la Figura 69 se observa como el tiempo de computado también es bastante notable a pesar del mayor número de caras que posee el poliedro. El tiempo es entonces un 30% del tiempo total del tetraedro y cerca de un 50% del hexaedro.

Cabe señalar, que el poliedro es el elemento de volumen que más recursos necesita, entorno los 1,2 GB por cada millón de celdas, mientras que el generado por hexaedros es de alrededor de 0,5 GB.

A pesar de ello, las ventajas superan la capacidad de memoria, además de que se necesitan un menor número de celdas que ayudaran a utilizar menos recursos. Por lo tanto, el elemento de volumen seleccionado es el poliedro.

Posteriormente, se pueden elegir otros modelos opcionales que ayudan a obtener una mejor calidad de malla.

- Thin Mesher

Este modelo es usado para generar volúmenes finos dentro de regiones. También se puede utilizar como un volumen opcional de ayuda al elemento volumétrico rellenedor.

- Extruder Mesher

Modelo opcional que ayuda al mallado volumétrico elemento volumétrico rellenedor extruyendo celdas ortogonales para zonas específicas, normalmente el Inlet y el Outlet, para extender el volumen.

- Generalized Cylinder Mesher

Modelo opcional que ayuda al mallado de poliedros a generar prismas con base poliédrica a lo largo de toda una geometría cilíndrica.

- **Prism Layer Mesher**

Modelo opcional que genera celdas prismáticas ortogonales al lado de las paredes de las superficies geométricas. Suele ayudar para mejorar la exactitud de flujos ya que evita tener que menguar elemento volumétrico general y ralentizar la simulación. Este método sucede exitosamente gracias a que en las paredes el flujo suele ser menos turbulento y se puede medir con prismas.

De modo que la estrategia de mallado viene configurada por prism layer en las zonas donde puedan existir bajos Reynolds y reducir excesivamente el empequeñecimiento de los poliedros, y para el resto del dominio se desarrolla toda una matriz de poliedros.

#### 5.2.1. Grid independency

A continuación, mediante una tabla se presentan los diferentes parámetros configurados que han sido evaluados para alcanzar el mallado óptimo. A partir de la primera fila los valores que se repitan en las configuraciones posteriores se dejarán en blanco.

<b><i>Audi R8 without diffuser</i></b>				
<b>Prism layer mesher</b>				
<b>Mallados:</b>	1	2	3	4
<b>Streching Function:</b>	Geometric		Hyperbolic Tangent	
<b>Streching Mode:</b>	Strech Factor		Wall thickness	
<b>Minimum thickness %:</b>	0.01			
<b>Boundary March angle:</b>	50			
<b>Convex Angle Limit:</b>	260			
<b>Polyhedral Mesher</b>				
<b>Optimization Cycles:</b>	1		2	
<b>Quality Threshold:</b>	0,4	0,6		
<b>Surface Remesher</b>				
<b>Minimum Face Quality:</b>	0,2			
<b>Mesh</b>				
<b>Base size:</b>	15 cm			
<b>Number of prism layers:</b>	5	4	5	
<b>Prism layer stretching:</b>	1.2	1,1	NO	
<b>Thickness of near wall prism layer:</b>	NO		0,3 cm	
<b>Prism layer thickness:</b>	30 % (3 cm)			
<b>Surface curvature:</b>	90			
<b>Surface growth rate:</b>	1.1	1,05	1,1	1,05
<b>Surface size</b>	<b>Minimum:</b>	10 %	8 %	
	<b>Target:</b>	80 %	70 %	80 %
<b>Tet/Poly Growth factor:</b>	1			
<b>Tet/Poly Volume Blending:</b>	0,5			
<b>Volumetric controls</b>				
<b>Size:</b>	6 cm		5 cm	

Number of prism layers:		2	Default		
Prism layer stretching:		1.25	Default		
Prism layer thickness:		11 cm	Default		
Region of diffuser					
Surface size	Minimum:	5 %			
	Target:	10 %			
Prism layer thickness:		10,5 cm			
Prism layer stretching:		1.1		NO	
Thickness of near wall prism layer:		NO		$4.9 \cdot 10^{-6}$ m	
Number of prism:		8		14	
Region of Floor					
Surface size	Minimum:	Default	8 %	5 %	
	Target:	Default	50 %	20 %	15 %
Prism layer thickness:		Default	33,3 %	10 cm	
Prism layer stretching:		Default	1,1	NO	
Thickness of near wall prism layer:		NO		0,01 cm	
Number of prism:		Default	6	14	
Region of Roof					
Surface size	Minimum:	10 %		8 %	
	Target:	25 %		12,5 %	9,5 %
Prism layer thickness:		2 cm	3 cm	3 cm	
Prism layer stretching:		1,1		NO	
Thickness of near wall prism layer:		NO		0,01 cm	
Number of prism:		6	9	8	
Region of Rest of car					
Surface size	Minimum:	10 %		8 %	
	Target:	50 %		30 %	

<b>Prism layer thickness:</b>	Default		Default	
<b>Prism layer stretching:</b>	Default		NO	
<b>Thickness of near wall prism layer:</b>	NO		Default	
<b>Number of prism:</b>	Default		Default	
<b>CELLS</b>	<b>1.233.465</b>	<b>1.598.977</b>	<b>4.866.931</b>	<b>7.981.445</b>

Tabla 1 Configuraciones generadas para alcanzar un ben mallado

Los resultados obtenidos en cada simulación se presentan en la siguiente Tabla 2:

<b>Mallados</b>	<b>Coeficiente de drag (<math>C_d</math>)</b>	<b>Fuerza de drag (<math>F_d</math>)</b>	<b><math>\Delta F_d</math> con las 50 últimas iteraciones</b>	<b>Nº total de iteraciones</b>
<b>1</b>	0,160	293,027 N	55,043 N	1408
<b>2</b>	0,153	281,571 N	0 N	1502
<b>3</b>	0,145	266,621 N	0,059 N	1431
<b>4</b>	0,144	263,838 N	0,134 N	735

Tabla 2 Resultados grid independency del mallado

Tal y como se muestra en la Tabla 1 y Tabla 2 la relación calidad-refinamiento del mallado decrece enormemente requiriendo un gran número de celdas para alcanzar el rango de calidad deseado, en este caso basta con obtener resultados en los que varíen los decimales.

Haciendo referencia a la Tabla 1, se ha de decir que a pesar de aumentar el número de celdas en gran medida, comparando el caso 3 y 4, el refinamiento constituido en el caso 4 no es más de 1,5 cm respecto al anterior y modificando nada más que cuatro de sus parámetros (Surface growth rate y target surface size) se incrementa  $3 \cdot 10^6$  de celdas, casi un 40 % más de celdas que en el caso 3. En cambio, cuando todavía las mallas son gruesas (casos 1 y 2) los cambios generados no provocan una alteración tan importante, casi  $4 \cdot 10^5$  celdas de diferencia a pesar de realizar multitud de cambios. Es por ello que, al realizar cambios en el mallado, sobre todo volumétrico, que es el que más costoso, se han de ejecutar progresivamente. El tiempo de ejecución de una mallado superficial varia entorno 0,5 min a 5 min aproximadamente, en cambio, el volumétrico va de 5 min a 45 min, según calcula el programa CFD.



Volviendo a la Tabla 2, la diferencia entre la tercera y cuarta simulación es muy pequeña (0,001 y 2,783 N para  $C_d$  y  $F_d$  respectivamente), en ese caso se concluye que seguir aumentando la calidad de la malla no ofrece una mejora sustancial de los resultados. Con otra simulación más refinada no se lograría un  $C_d$  distinto al 4 pero si se alcanzarían tiempos de simulación bastante más prolongados, de manera que se elige el último caso como la configuración de mallado óptima para la elaboración del resto de simulaciones. Desafortunadamente el tiempo de simulación no se ha logrado obtener de forma exacta por el propio programa, aunque ha habido una percepción notable entre ellos por el diseñador aproximadamente en el caso 1 se tardaron 4-5 horas las 1408 iteraciones mientras que en el caso 4 ascendió a unas 16 horas las 735 iteraciones, por esa razón no se muestran.

Como se puede ver a continuación (véase Figura 70), los residuos de la última simulación logran caer por debajo de  $1 \cdot 10^{-4}$ , el cual es un valor adecuado para la obtención de datos. Incluso para la ecuación de continuidad, en rojo, y el momento en x, en verde, se logra disminuirlos hasta el  $1 \cdot 10^{-5}$ .

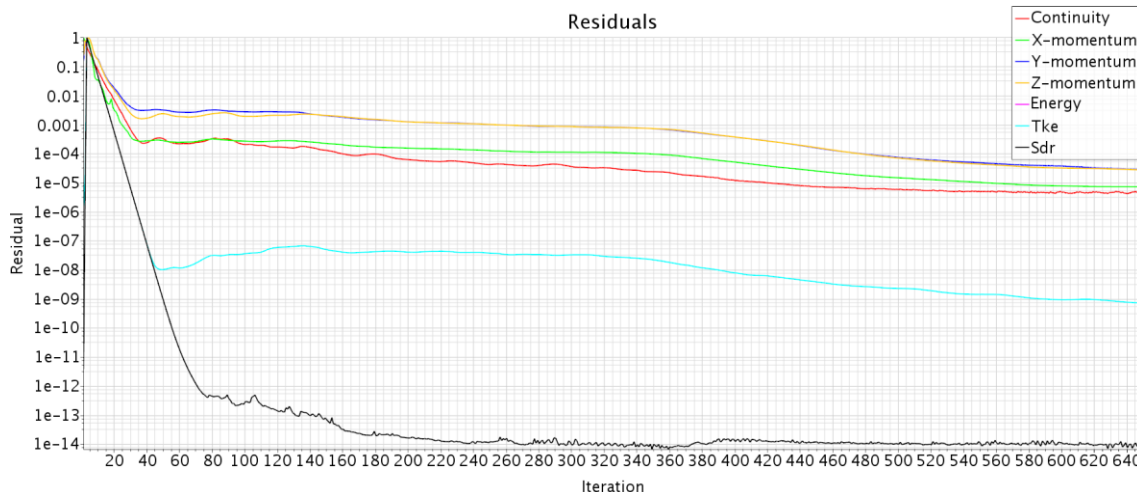


Figura 70 Residuos de la simulación óptima

Por otro lado, los resultados de las fuerzas drag y lift obtenidos (véase Figura 71) se mantienen constante con una ligera variación en las milésimas, exactamente de 0,0014 N.



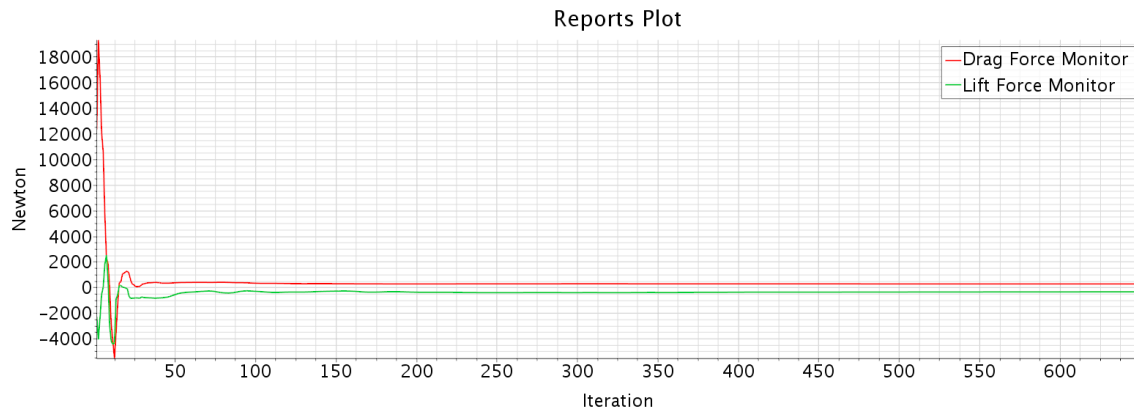


Figura 71 Resultados de la simulación óptima

Como resultado final se obtienen fuerzas de drag y lift de 263,64 N y -353,21 N respectivamente. Para este valor de drag se calcula su coeficiente de drag, tal y como se expresa en el apartado 3.3., dando como solución 0,144, un coeficiente muy lejos del valor real (0,34), posiblemente esta variación viene dada por los cambios efectuados.

Al evitar huecos y elementos del propio coche como el del limpiaparabrisas o el retrovisor, provocan un flujo del aire mucho más limpio sin la creación de vórtices que aumenten el drag. Además, también se han eliminado las ruedas que junto con la llanta no forman un objeto macizo, la aligeración de peso de la llanta establece un gran hueco en su interior donde se crean turbulencias de velocidad cercanas a cero, proyectando así una estela de turbulencias dirigidas a la parte trasera del coche. Por otro lado, se ha idealizado todo un suelo perfectamente plano, algo distante de lo que realmente es (véase Figura 18) para facilitar su simulación. Otro factor que también puede influenciar en mayor o menor medida es la temperatura que se genera, la cual es extraída por el tubo de escape y por unas aletas en la luna de atrás que también han sido eliminadas.

Todo este conjunto de cambios ha favorecido a la aerodinámica del coche disminuyendo, como se ha visto, la resistencia al avance. Aun así, el flujo mostrará una circulación similar a la del real y finalmente, aunque los resultados de los difusores no sean del todo reales se podrá observar cuál de ellos muestra un mejor comportamiento en comparación a los demás de manera que se procede a analizar la calidad del mallado.

### 5.3. Análisis del mallado

Para verificar que se ha ejecutado la malla adecuada y se ha respetado una calidad mínima de las celdas, se ha de tener en cuenta los siguientes valores, que son, gran parte de ellos, un diagnóstico elaborado por el propio programa.

- Validez de las caras (Face validity)
- Cambio de volumen (Change volume)
- Ángulo de asimetría (skewness angle)
- Wall Y+

#### Validez de las caras

La validez de la cara es una medida ponderada de área de la corrección de las caras normales relativas al centroide de su celda adjunta.

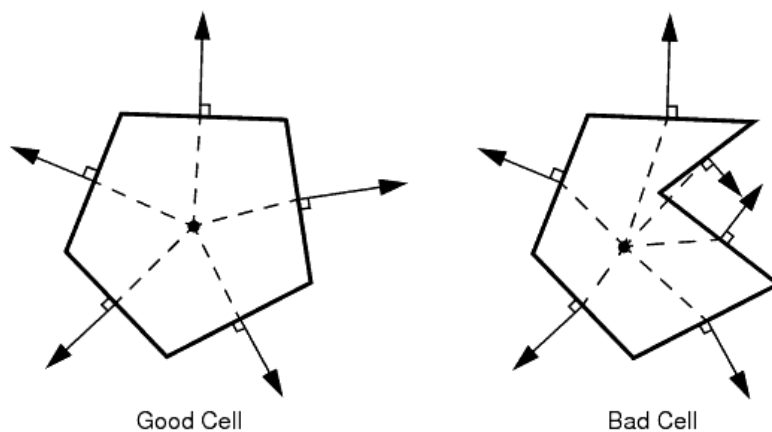


Figura 72 Diferencia entre una adecuada cara y una que no [31]

Un adecuado resultado es cuando las caras normales tienen dirección hacia fuera del centroide de la celda, en cambio, uno no adecuado es aquel en que una o más de unas caras normales tienen dirección hacia el centroide de la celda. El rango con el que se mide es con un 1.0 si todas las caras normales van hacia fuera, menos de 1.0 si alguna de sus caras apunta hacia dentro hasta 0.5. Con 0.5 se considera una celda con volumen negativo y no es registrada como buena.

```

Face validity:
Minimum Face Validity: 1.0000000000e+00
Maximum Face Validity: 1.0000000000e+00
    Face Validity < 0.50          0    0.000%
0.50 <= Face Validity < 0.60      0    0.000%
0.60 <= Face Validity < 0.70      0    0.000%
0.70 <= Face Validity < 0.80      0    0.000%
0.80 <= Face Validity < 0.90      0    0.000%
0.90 <= Face Validity < 0.95      0    0.000%
0.95 <= Face Validity < 1.00      0    0.000%
1.00 <= Face Validity             7981445 100.000%

```

Figura 73 Validez de caras caso sin difusor

```

Face validity:
Minimum Face Validity: 1.0000000000e+00
Maximum Face Validity: 1.0000000000e+00
    Face Validity < 0.50          0    0.000%
0.50 <= Face Validity < 0.60      0    0.000%
0.60 <= Face Validity < 0.70      0    0.000%
0.70 <= Face Validity < 0.80      0    0.000%
0.80 <= Face Validity < 0.90      0    0.000%
0.90 <= Face Validity < 0.95      0    0.000%
0.95 <= Face Validity < 1.00      0    0.000%
1.00 <= Face Validity             8135229 100.000%

```

Figura 74 Validez de caras caso difusor original

```

Face validity:
Minimum Face Validity: 1.0000000000e+00
Maximum Face Validity: 1.0000000000e+00
    Face Validity < 0.50          0    0.000%
0.50 <= Face Validity < 0.60      0    0.000%
0.60 <= Face Validity < 0.70      0    0.000%
0.70 <= Face Validity < 0.80      0    0.000%
0.80 <= Face Validity < 0.90      0    0.000%
0.90 <= Face Validity < 0.95      0    0.000%
0.95 <= Face Validity < 1.00      0    0.000%
1.00 <= Face Validity             8103464 100.000%

```

Figura 75 Validez de caras caso aletas rectas

```

Face validity:
Minimum Face Validity: 1.0000000000e+00
Maximum Face Validity: 1.0000000000e+00
      Face Validity < 0.50          0    0.000%
0.50 <= Face Validity < 0.60      0    0.000%
0.60 <= Face Validity < 0.70      0    0.000%
0.70 <= Face Validity < 0.80      0    0.000%
0.80 <= Face Validity < 0.90      0    0.000%
0.90 <= Face Validity < 0.95      0    0.000%
0.95 <= Face Validity < 1.00      0    0.000%
1.00 <= Face Validity              8019443 100.000%
  
```

Figura 76 Validez de caras caso aletas curvadas

Como se observa (véase Figura 73- Figura 76), el programa ha diagnosticado que la calidad mínima de las caras es la máxima posible, obteniendo un 100% de caras con dirección al exterior del centroide. Lo que origina una malla de triangulo totalmente equiláteros y una espectacular calidad superficial.

### Cambio de volumen

Esta métrica describe el ratio del volumen de las celdas con sus adyacentes más grandes.

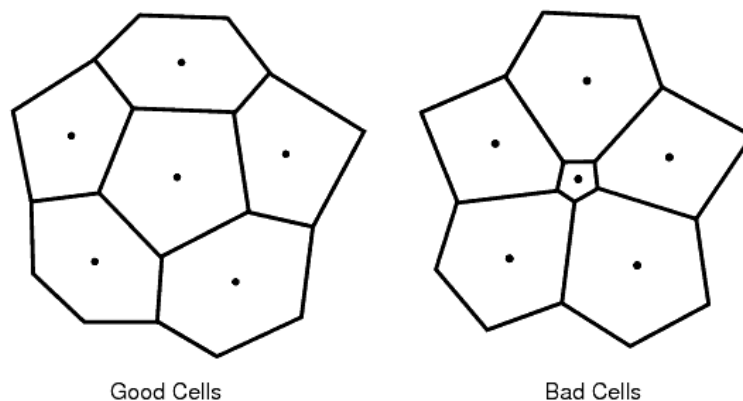


Figura 77 Diferencia entre un adecuado salto volumétrico y otro que no [32]

Un gran salto de volumen podría suscitar a una mala exactitud y no converger, El rango con el que se describen es con un 1.0 si la celda tiene un volumen igual o mayor al de sus adyacentes, menos de 1.0 si existe un desnivel de volúmenes hasta  $1 \cdot 10^{-5}$ , entonces se considera una celda degenerada y no adecuada.

```

Volume Change:
Minimum Volume Change: 6.309737e-04
Maximum Volume Change: 1.000000e+00
    Volume Change < 0.000000e+00      0      0.000%
0.000000e+00 <= Volume Change < 1.000000e-06      0      0.000%
1.000000e-06 <= Volume Change < 1.000000e-05      0      0.000%
1.000000e-05 <= Volume Change < 1.000000e-04      0      0.000%
1.000000e-04 <= Volume Change < 1.000000e-03      9      0.000%
1.000000e-03 <= Volume Change < 1.000000e-02     1056     0.013%
1.000000e-02 <= Volume Change < 1.000000e-01    100072    1.254%
1.000000e-01 <= Volume Change <= 1.000000e+00   7880308   98.733%

```

Figura 78 Validez de cambio de volumen caso sin difusor

```

Volume Change:
Minimum Volume Change: 6.033026e-04
Maximum Volume Change: 1.000000e+00
    Volume Change < 0.000000e+00      0      0.000%
0.000000e+00 <= Volume Change < 1.000000e-06      0      0.000%
1.000000e-06 <= Volume Change < 1.000000e-05      0      0.000%
1.000000e-05 <= Volume Change < 1.000000e-04      0      0.000%
1.000000e-04 <= Volume Change < 1.000000e-03     14      0.000%
1.000000e-03 <= Volume Change < 1.000000e-02    1661     0.020%
1.000000e-02 <= Volume Change < 1.000000e-01   103156    1.268%
1.000000e-01 <= Volume Change <= 1.000000e+00   8030398   98.711%

```

Figura 79 Validez de cambio de volumen caso difusor original

```

Volume Change:
Minimum Volume Change: 4.534544e-05
Maximum Volume Change: 1.000000e+00
    Volume Change < 0.000000e+00      0      0.000%
0.000000e+00 <= Volume Change < 1.000000e-06      0      0.000%
1.000000e-06 <= Volume Change < 1.000000e-05      0      0.000%
1.000000e-05 <= Volume Change < 1.000000e-04      3      0.000%
1.000000e-04 <= Volume Change < 1.000000e-03     28      0.000%
1.000000e-03 <= Volume Change < 1.000000e-02    2286     0.028%
1.000000e-02 <= Volume Change < 1.000000e-01   103421    1.276%
1.000000e-01 <= Volume Change <= 1.000000e+00   7997726   98.695%

```

Figura 80 Validez de cambio de volumen caso aletas rectas

```

Volume Change:
Minimum Volume Change: 3.877776e-04
Maximum Volume Change: 1.000000e+00
    
```

Volume Change < 0.000000e+00	0	0.000%
0.000000e+00 <= Volume Change < 1.000000e-06	0	0.000%
1.000000e-06 <= Volume Change < 1.000000e-05	0	0.000%
1.000000e-05 <= Volume Change < 1.000000e-04	0	0.000%
1.000000e-04 <= Volume Change < 1.000000e-03	15	0.000%
1.000000e-03 <= Volume Change < 1.000000e-02	2011	0.025%
1.000000e-02 <= Volume Change < 1.000000e-01	102884	1.283%
1.000000e-01 <= Volume Change <= 1.000000e+00	7914533	98.692%

Figura 81 Validez de cambio de volumen caso aletas curvadas

El diagnóstico de cambio volumétrico de todos los casos (véase Figura 78 - Figura 81) es considerado aceptable. En todos ellos no cabe ninguna celda con una relación menor a la  $1 \cdot 10^{-4}$  a excepción del caso con las aletas rectas, en el que yacen 3 celdas, valor tan ínfimo que no logra ser un porcentaje visible, al igual que en todos los casos las celdas que yacen entre el  $1 \cdot 10^{-4}$  y  $1 \cdot 10^{-3}$ . En cuanto a valores significativos se observa que más del 98,5% de las celdas se encuentran en un rango entre el 0,1 y el 1. Lo que origina que el ratio de las celdas con su celda adyacente más grande sea para la mayoría entre 0,1 y 1, ofreciendo así una muy buena calidad de progresión de crecimiento entre unas y otras.

### Ángulo de asimetría

El ángulo de asimetría  $\theta$  es el ángulo entre el vector del área de la cara "a" y el vector que conecta ambos centroides de celda "ds" (véase Figura 82).

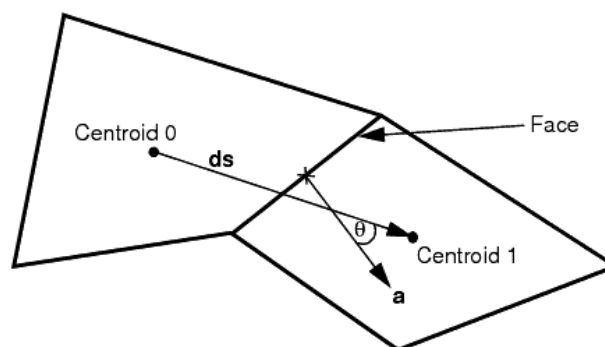


Figura 82 Ángulo de asimetría [33]

Para evitar la robustez se ha de establecer un ángulo menor de  $85^\circ$ . Aunque este valor pierde importancia cuando se estudian flujos turbulentos, donde se utilizan las funciones de pared (Wall functions). De modo que, en caso de flujo laminar y transferencia de calor en sólidos sería un parámetro a tener muy en cuenta.

- Sin difusor

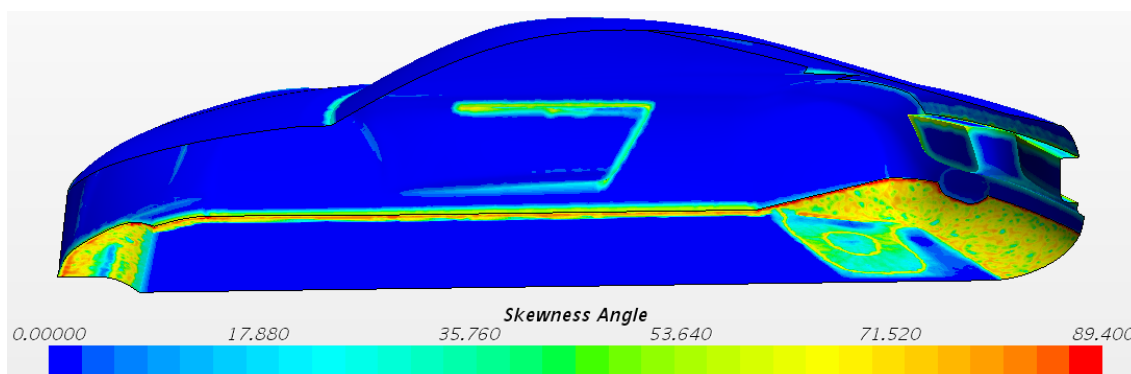


Figura 83 Visión global del ángulo de asimetría (Caso sin difusor)

Maximum boundary skewness angle in region = 8.994925e+01 deg

Figura 84 Validez del ángulo de asimetría caso sin difusor

- Difusor original

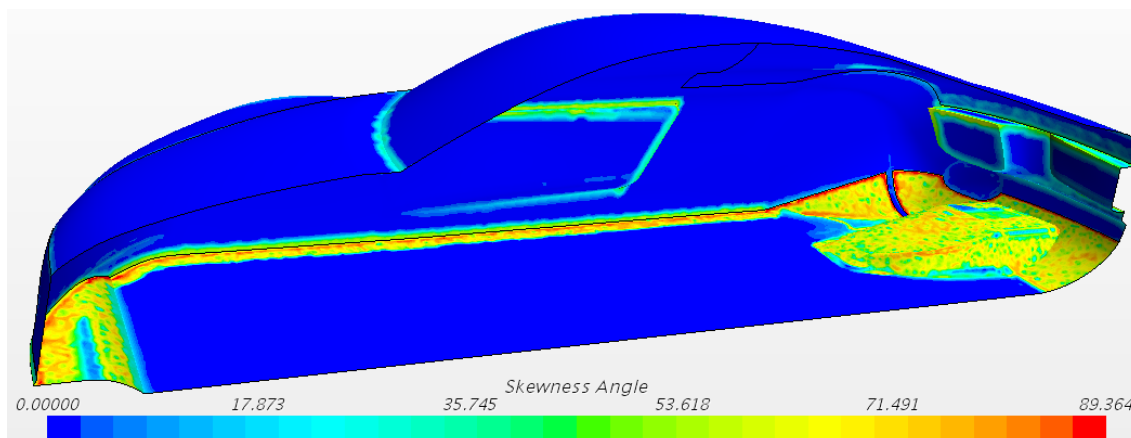


Figura 85 Visión global del ángulo de asimetría (Caso original)

Maximum boundary skewness angle in region = 8.972900e+01 deg

Figura 86 Validez del ángulo de asimetría caso difusor original



- Difusor de aletas rectas

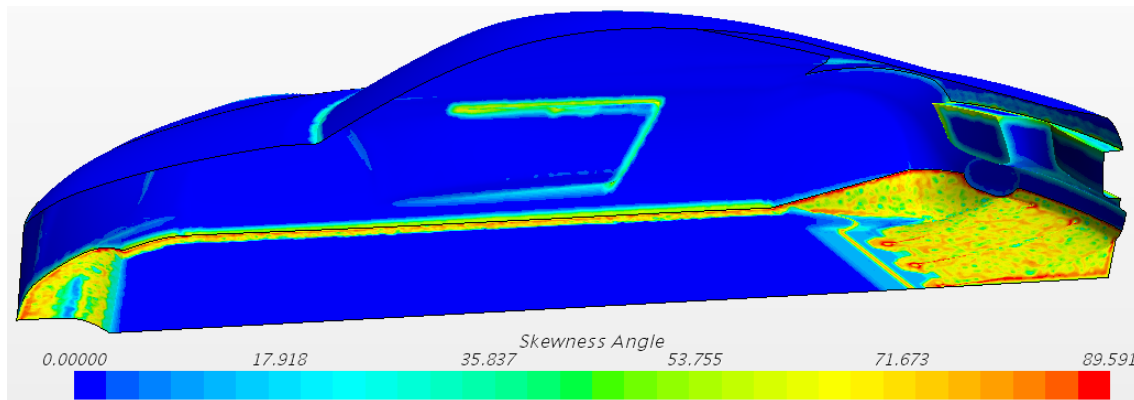


Figura 87 Visión global del ángulo de asimetría (Caso aletas rectas)

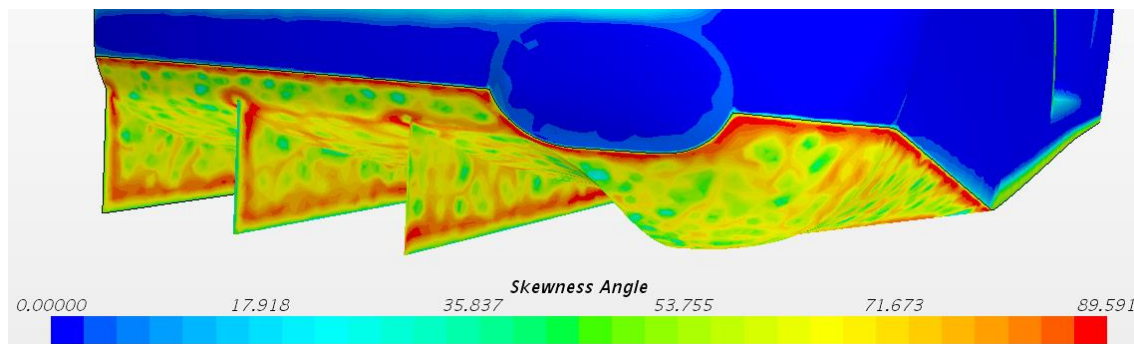


Figura 88 Visión del difusor del ángulo de asimetría (Caso aletas rectas)

Maximum boundary skewness angle in region = 8.998331e+01 deg

Figura 89 Validez del ángulo de asimetría caso aletas rectas

- Difusor de aletas curvadas

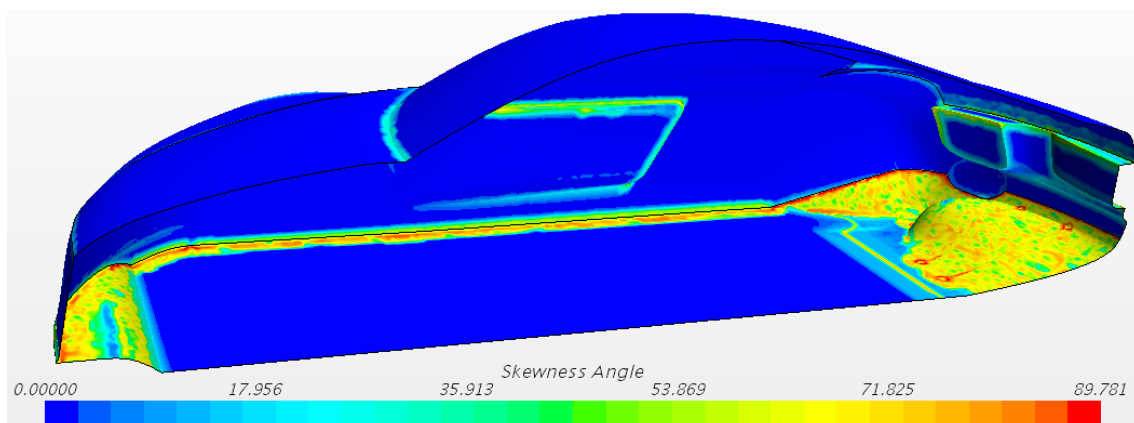


Figura 90 Visión global del ángulo de asimetría (Caso aletas curvadas)



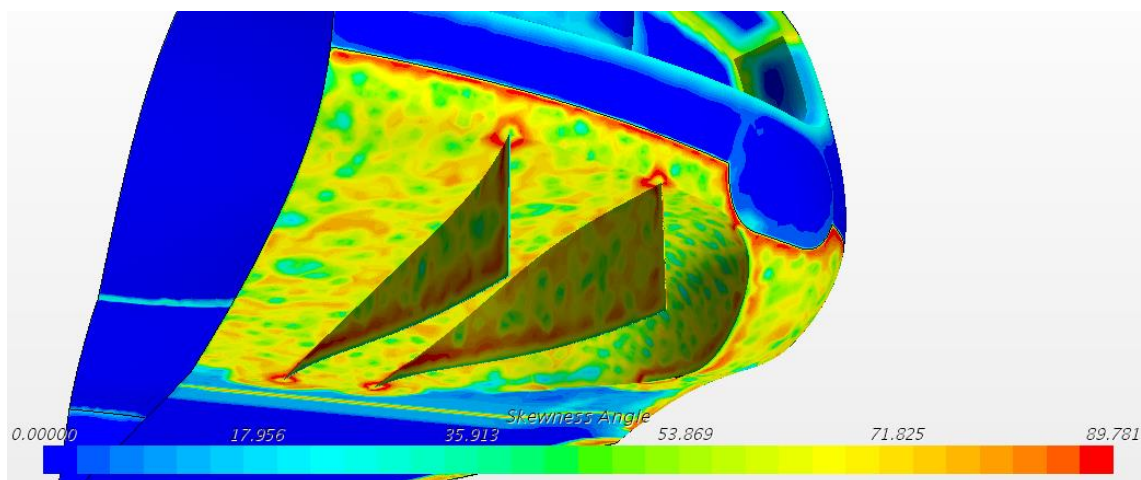


Figura 91 Visión del difusor del ángulo de asimetría (Caso aletas curvadas)

Maximum boundary skewness angle in region = 9.038586e+01 deg

Figura 92 Validez del ángulo de asimetría caso difusor original

Para el skewness angle se puede observar que toda la superficie del coche cumple a excepción de ciertas zonas, en ellas se llegan a alcanzar un ángulo que supera lo  $85^\circ$  de máxima. Estos desafortunados valores se hallan en todo el borde de la superficie denominada difusor, y en caso de tener aletas, en sus vértices.

A pesar de ello, se desprecian estas celdas, asumiendo que ofrecerán unos valores no tan apropiados, ya que resultan ser un número de celdas insignificante y teniendo en cuenta que en estado turbulento este valor precisa de una menor importancia y que los anteriores diagnósticos han presentado una muy buena calidad.

## Wall Y+

Mediante una representación gráfica y una vez finalizada la simulación, se puede ver qué régimen de la capa límite se ha alcanzado a estudiar. Como en este proyecto el modelo se ha dividido en distintas regiones tendrán distintos valores según la eficacia que se haya querido obtener en cada una de ellas.

- Sin difusor

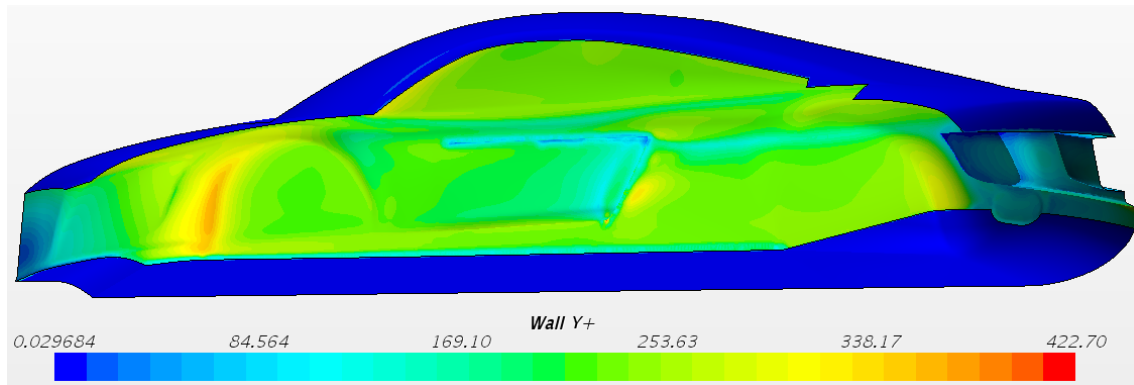


Figura 93 Visión global del Y+ (Caso sin difusor)

- Difusor original

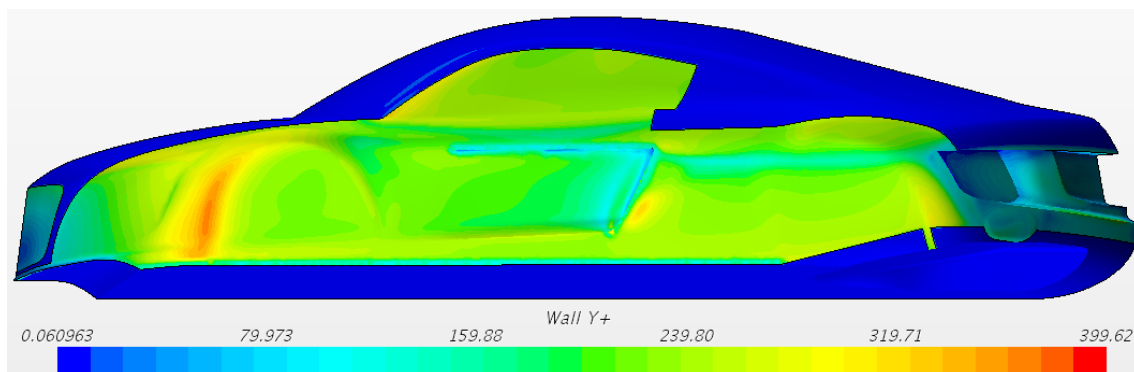


Figura 94 Visión global del Y+ (Caso difusor original)

- Difusor de aletas rectas

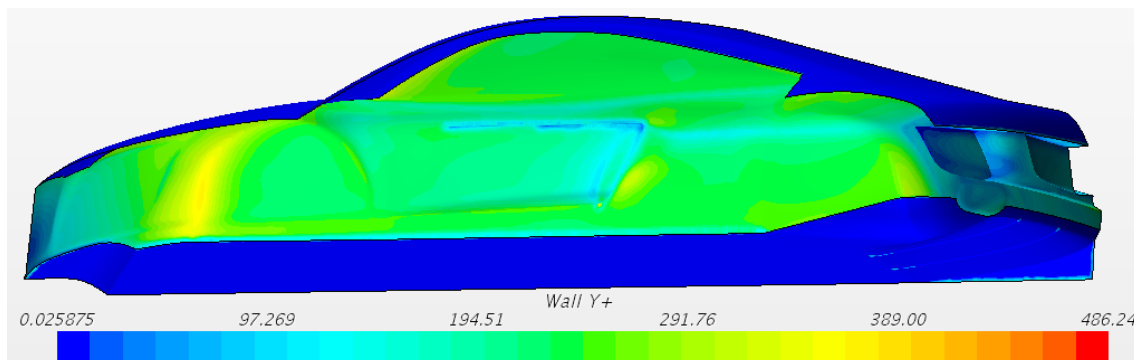


Figura 95 Visión global del Y+ (Caso aletas rectas)

- Difusor de aletas curvadas

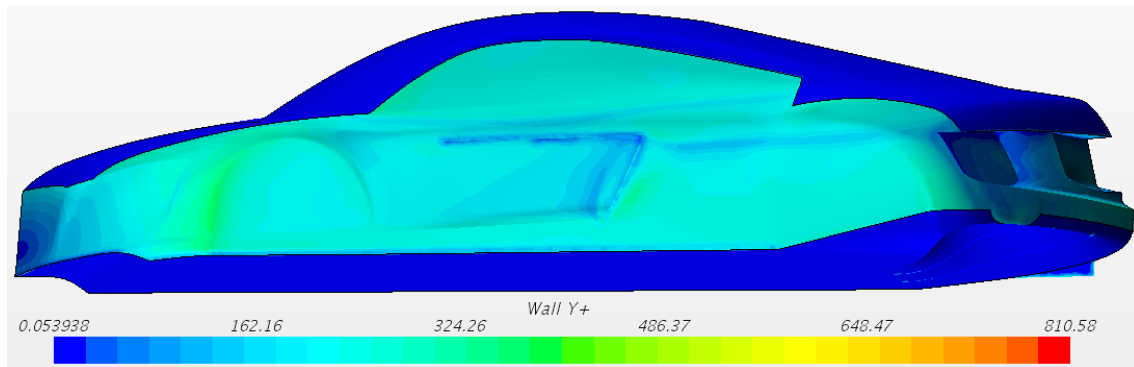


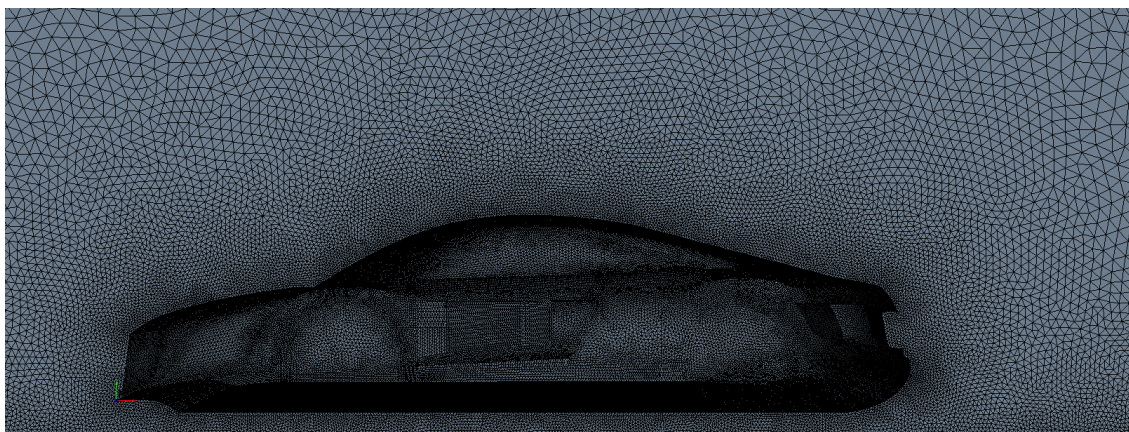
Figura 96 Visión global del Y+ (Caso aletas curvadas)

El Wall y+ no es un valor que distinga de una malla adecuada o no, pero sí que ayuda a diagnosticar si el afinamiento del prism layer ha logrado alcanzar la subcapa deseada. En estos casos (Figura 93 - Figura 96) se han logrado en las zonas del techo (Roof) y del difusor (diffuser) alcanzar la subcapa viscosa con una  $Y+ < 1$  (véase Figura 12). En cambio, todo el resto del coche (Rest of car) no se han requerido conocer unos datos tan precisos y es por ello que yacen en un rango entre los 200 y 250 (subcapa exterior).

## 5.4. Resultados

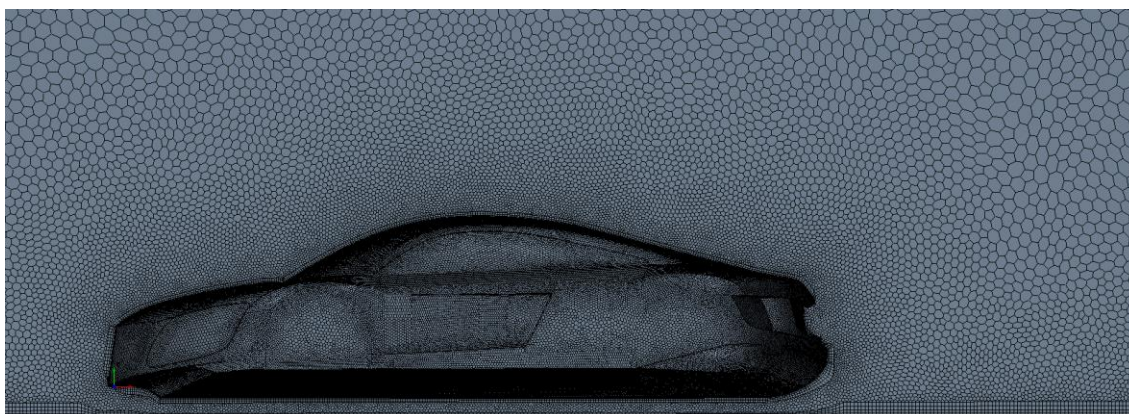
### 5.4.1. Caso sin difusor

La calidad del mallado del modelo original es definida en las Figura 97 y Figura 98 en las que se puede apreciar como desde las celdas más pequeñas, situadas en la superficie del coche y en el suelo, para obtener datos más concisos de la envolvente del coche y la estela, crecen a medida que se alejan logrando refinar el envolvente de mayor importancia y dejando engordar aquellas celdas de menor peso.



*Figura 97 Mallado superficial (Caso sin difusor)*

El mallado superficial es descrito por formas triangulares por el propio programa de CFD, que para los elementos volumétricos de tetraedros y poliedros se generan de esta forma. Como se observa en ambos mallados tanto los triángulos como los poliedros presentan una silueta monótona, y siempre que se ha podido, sin alteraciones de forma, el crecimiento constante ayuda a no partirlos de manera brusca y homogeneizando en todo lo posible.



*Figura 98 Mallado volumétrico (Caso sin difusor)*

Este proceso se repite en todos los casos, y el refinamiento será prácticamente el mismo, la única diferencia aparente reside en el entorno del mallado donde se sitúa el difusor.

En cuanto a la velocidad del flujo por todo el dominio (Figura 99 - Figura 103) se observa que por la parte superior la velocidad es mucho mayor que por debajo el coche. Este fenómeno sucede, como se ha explicado anteriormente, por haber un mayor recorrido por la parte superior, es entonces cuando aumenta la velocidad para poder desembocar al mismo tiempo, junto con la inferior. Posteriormente se verá como este fenómeno

provoca una sustentación del coche causada por la baja presión generada en la parte superior.

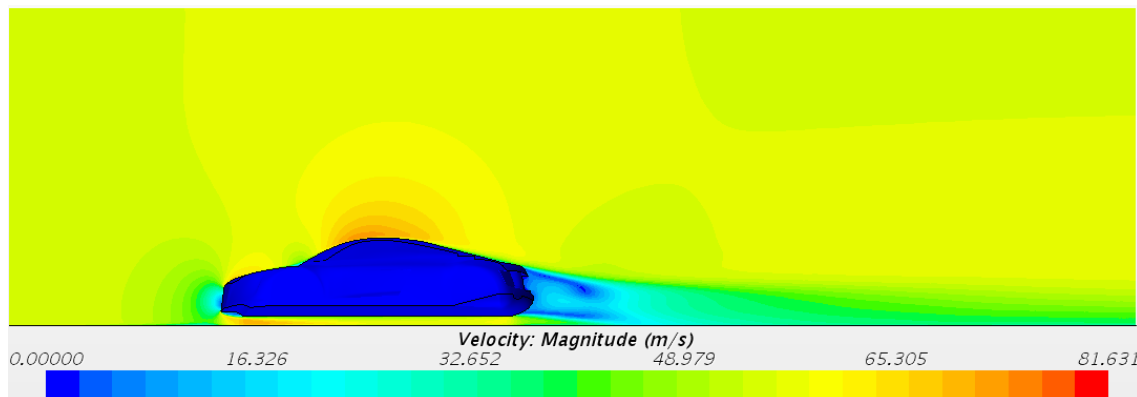


Figura 99 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso sin difusor)

En la Figura 100 se amplía la imagen consiguiendo ver mejor el flujo por debajo del suelo, el cual alcanza su punta, después de oprimirse con el faldón alcanzando una tonalidad naranja, de uno 75 m/s. A posteriori este flujo va disminuyendo su velocidad perdiendo su tonalidad hasta empezar la curvatura de lo que sería el difusor con una velocidad igual a la inicial. En ese punto se distingue una reducción brusca a una tonalidad más verdosa, la cual se ve afectada por las turbulencias originadas por la geometría plana de la trasera del coche, siguiendo de esta manera el flujo superior su dirección tangencial al perfil.

El diseñar una trasera “cortada” no es casualidad ya que como se puede ver es la causante de hacer desprender la capa límite favoreciendo en gran medida las turbulencias y logrando una alta presión en esa zona. Si se hubiera diseñado una trasera acabada en punta llegando hasta el suelo, la capa límite continuaría sobre el perfil hasta ser desprendida junto al suelo sin manifestarse ninguna presión que empujase el coche en su dirección de movimiento.



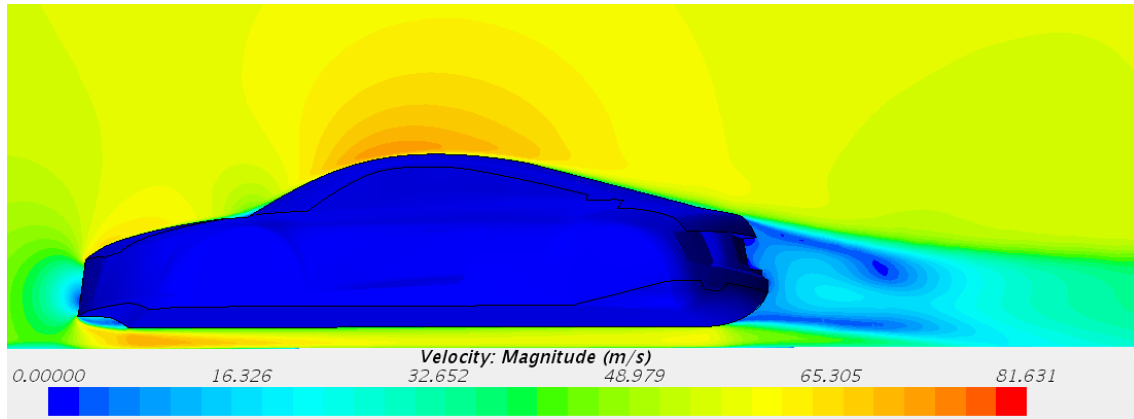


Figura 100 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso sin difusor)

En la Figura 101 se aprecia con mayor facilidad la capa límite formada por todo la parte superior y las turbulencias originadas. Por otro lado, la sección horizontal, a una altura de 0,1 m del suelo, permite ver como el flujo inferior desemboca hacia el exterior en forma de vectores desde cada celda.

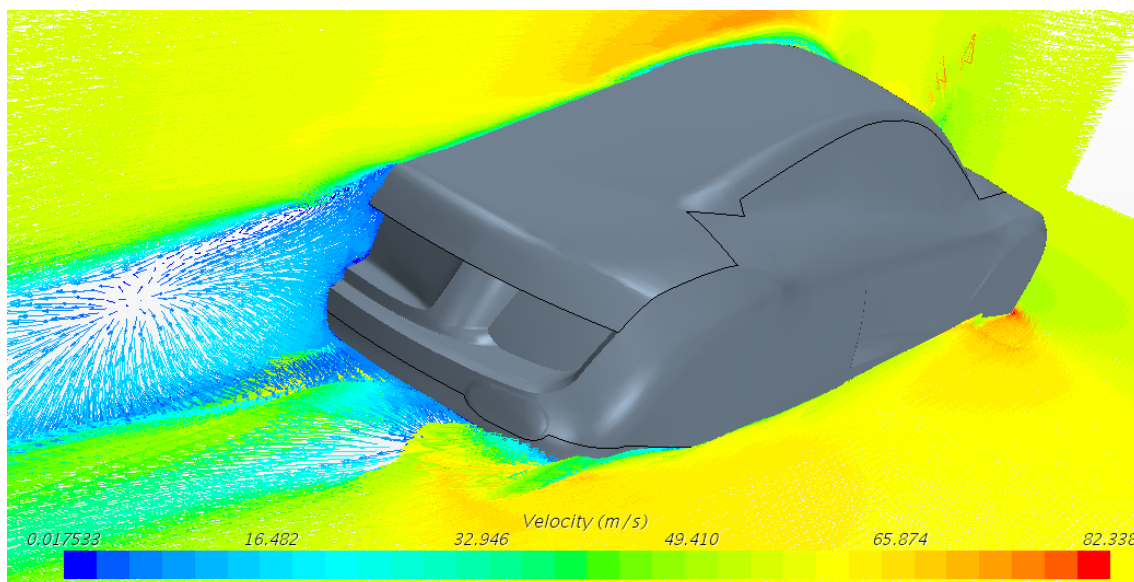


Figura 101 Flujo del aire global en modo vector (Caso sin difusor)

En las siguientes figuras (Figura 102 y Figura 103) se muestra como el flujo despedido se arremolina hacia una franja de unos 45 m/s creando una especie de montaña a un cuarto del ancho del coche desde la pared central.

Por la parte exterior de este, se puede observar también como el flujo que pasa por el lateral desea incidir hacia el interior del remolino, pero es empujado hacia fuera por la alta presión provocada y despedido paralelamente en la dirección del vehículo.

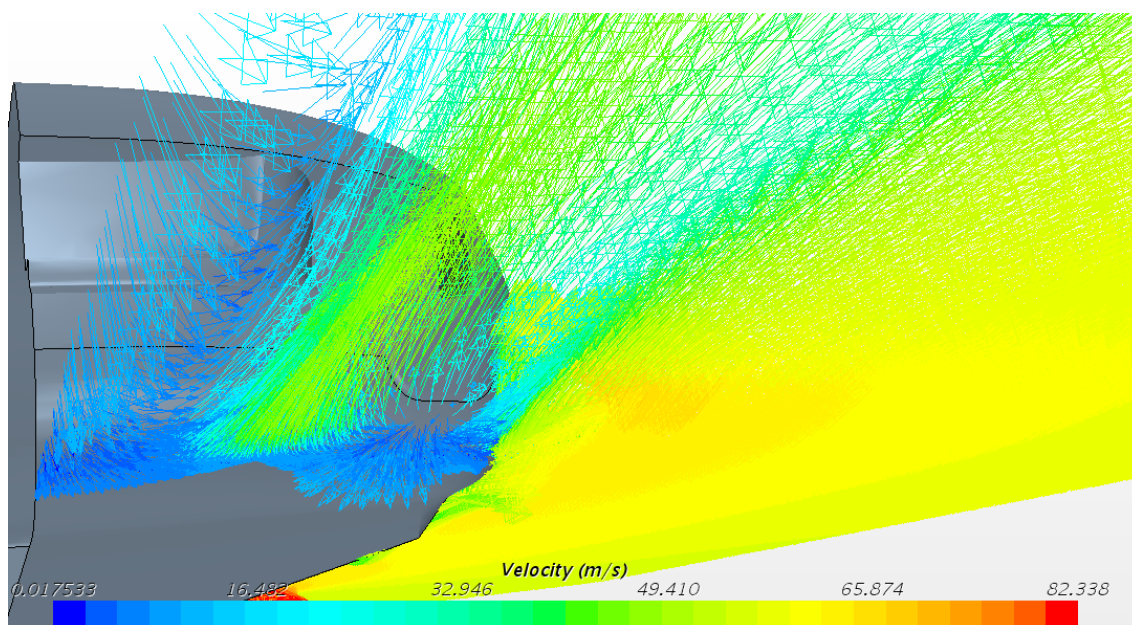


Figura 102 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso sin difusor)

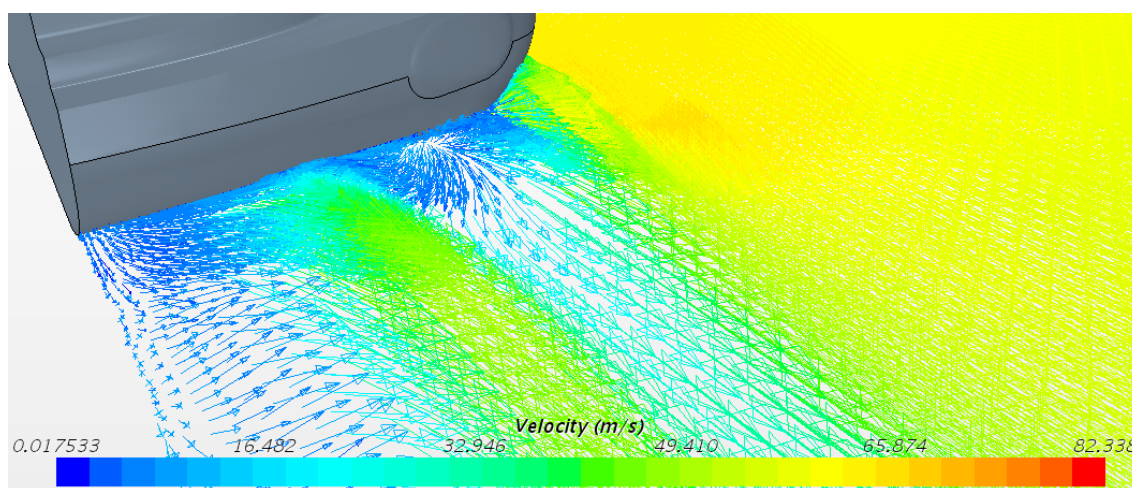


Figura 103 Flujo del aire vista superior en modo vector (Caso sin difusor)

Esta distribución de velocidades no es la más recomendada ya que la baja velocidad debería de surgir una vez el flujo es desembocado, no en su transcurso. Los vectores azules demuestran como la velocidad es próxima a 0 y por lo tanto una alta presión se origina en esa zona, sustentándolo aún más.

En cuanto a las presiones, son un reflejo invertido de la distribución de velocidades mediante la ecuación de Bernoulli. En las imágenes siguientes (véase Figura 104 - Figura 106) se puede cuantificar la presión relativa a la atmosférica. Una de las zonas más

interesantes que examinar es la presión bajo el coche, la cual visualmente disminuye logrando valores negativos de entorno -400 Pa. Por otro lado, aun siendo un valor favorable, es un valor relativo a la atmosfera, esta ha de ser comparada con la superior donde la presión también disminuye en ciertas zonas y con una magnitud mínima mayor, de entorno - 1000 Pa.

No obstante, se ha de tener en cuenta que en la parte superior existe una alta presión que, en la esquina de la luna delantera, esta ronda un valor aproximado de 1900 Pa. La causa es porque el aire a esta velocidad no circula por toda la superficie, sino que “toma atajos”, creando una trayectoria lo más aerodinámica posible, evitando así los cantos acusados interiores. En ellos como se puede ver, se crean zonas de no circulación, lo que significa  $v \approx 0$  m/s y  $P$ =altas.

La zona de luna trasera también se genera una presión no negativa muy próxima a la atmosférica. A diferencia de la anterior, esta no precisa ningún perfil acusado permitiendo a la capa límite no despegarse y evitando alcanzar enormes presiones.

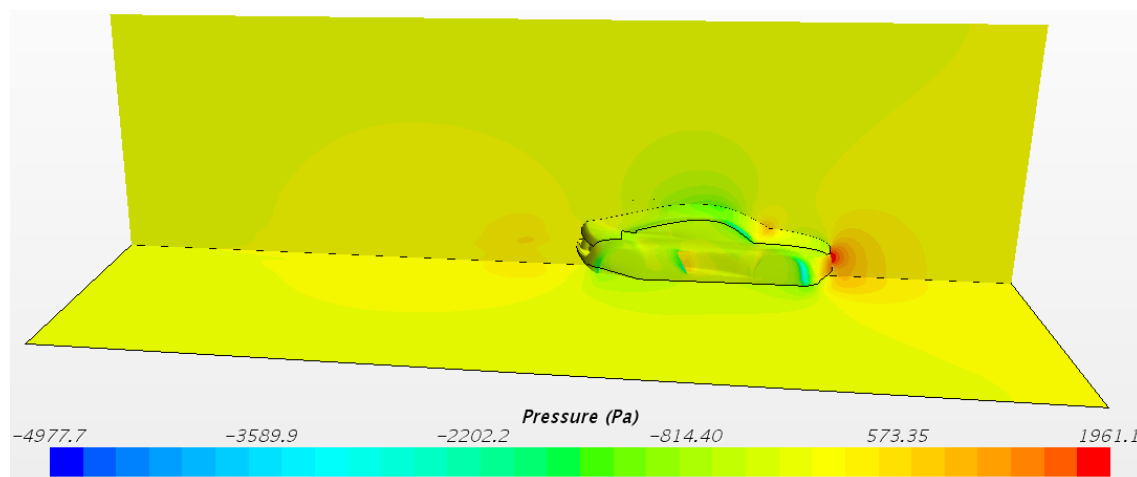


Figura 104 Presión relativa entorno el coche (Caso sin difusor)

El lateral del coche, no es una zona que en este proyecto se tenga muy en cuenta, porque al variar la geometría los datos no son tan fiables como el resto. Un ejemplo es la alta presión generada en la entrada de aire, en esta zona no existe una entrada de aire, sino que yace una pared que impide el paso del flujo hacia el interior generando una alta presión. El hueco de las ruedas, el frontal y la ventanilla, que ha sido alargada uniéndose con la cara exterior de una entrada de aire, también modifican el paso del flujo en cierta



medida. Aun así, sería un buen plan de futuro tener en cuenta todas estas regiones, que pueden disminuir la fuerza de arrastre y mejorar la de succión contra el suelo.

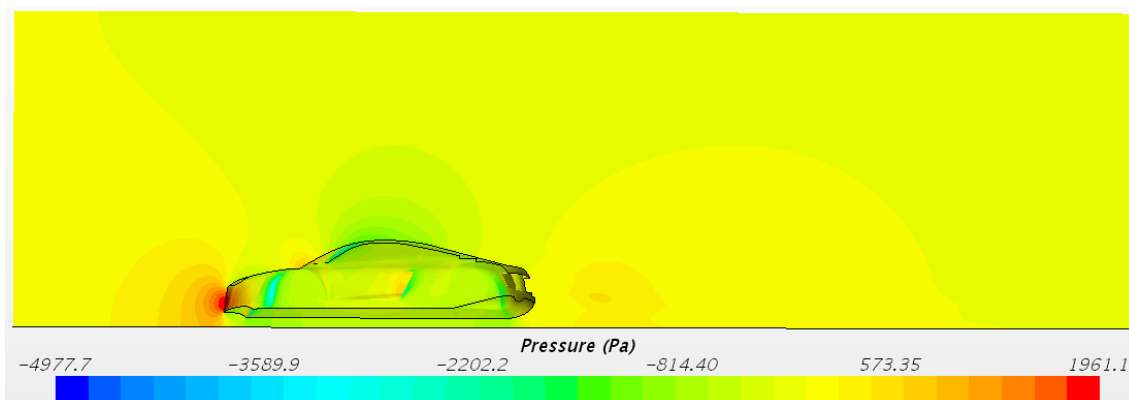


Figura 105 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso sin difusor)

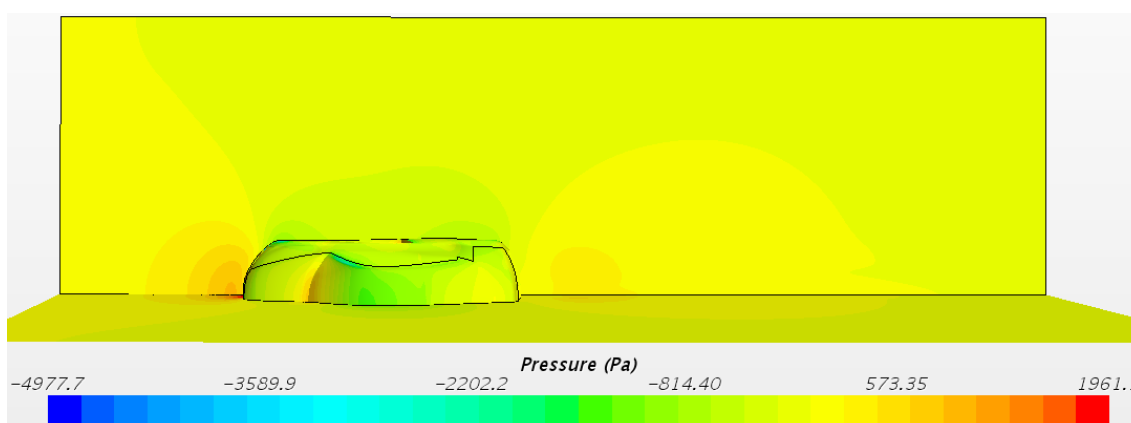


Figura 106 Presión relativa del dominio vista planta (Caso sin difusor)

Por esa razón, estos gráficos ayudan a distinguir las áreas a tratar para perfilar la geometría a la necesidad del vehículo. Como es sabido, no se puede cuantificar la presión en cada punto o conocer con exactitud la presión en cada área ya que como se ha explicado varía constantemente. Es por ello que se han generado una serie de tablas, en las que se presentan la presión media tanto en Pascales como en Newtons de cada sección del coche.

Para comprobar que si realmente sucede una sustentación o una succión hacia el asfalto se extraen los datos en las siguiente tablas (véase Tabla 3 - Tabla 5):

La Tabla 3 se define la presión media relativa generada en cada sección, este valor sirve de referencia para conocer la cantidad de presión que disminuye en toda la sección.

Parts	Pressure (Pa)
Diffuser	-584,608
Rest of car	-357,212
Roof	-502,365
<b>Totals</b>	<b>-475,357</b>

Tabla 3 Presión del vehículo (Caso sin difusor)

Comparando las presiones del diffuser con la del roof se puede ver como ambos son succionados hacia el exterior, la resta de ambos valores da a conocer la diferencia existente, en este caso de 82,243 Pa a favor del diffuser. Lo que significa que la presión empuja al vehículo contra el asfalto más que sustentarlo como se podía creer en un principio. Finalmente una presión de -475,357 Pa succiona todo el perímetro del coche.

A continuación, se presentan las fuerzas ejercidas en los ejes “y” y “x” divididas en una tabla cada una. En la primera de ella se define el Lift como la suma de la presión y la fricción resultante, en Newtons, en la dirección y de todas las secciones que forman el vehículo (Diffuser, Rest of car y Roof). El sumatorio de todas ellas proporcionan la fuerza neta en dicho eje.

Lo mismo sucede en el eje x donde la fuerza resultante es el drag, a diferencia de la del eje y, esta fuerza se desea que se mantenga o aumente lo mínimo posible.

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	-386.223,30	-0,049	-386.223,35
Rest of car	98.573,080	1,487	98.574,570
Roof	287.293.500	2,124	287.295,600
<b>Totals</b>	<b>-356,773</b>	<b>3,562</b>	<b>-353,211</b>

Tabla 4 Fuerza lift del vehículo (Caso sin difusor)

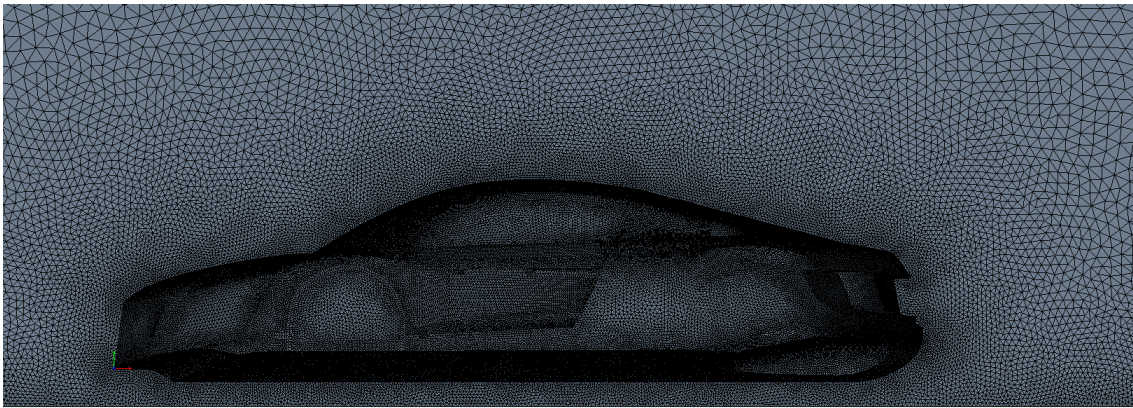
Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	12.888,450	17,925	12.906,370
Rest of car	-7.956,913	22,889	-7.934,024
Roof	-472,962	21,109	-4.708,509
<b>Totals</b>	<b>201,915</b>	<b>61,923</b>	<b>263,838</b>

Tabla 5 Fuerza drag del vehículo (Caso sin difusor)

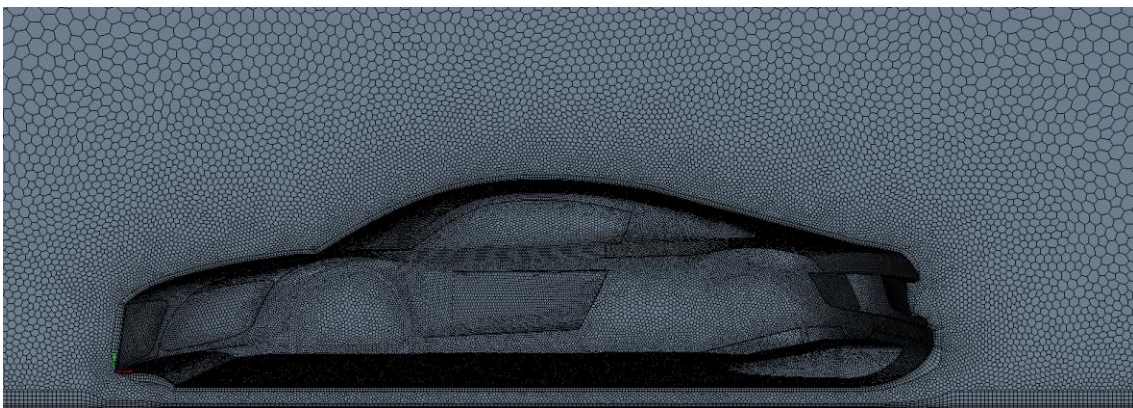
Finalmente, con el perfil simulado se obtiene una succión contra el asfalto de -353,211 N y una fuerza opositora al avance de 263,838 N. Más adelante, se verá si los difusores creados son adecuados o si es preferible no llevar difusor como sería el caso.

#### 5.4.2. Caso 1 (Difusor original)

Tal y como se mencionaba anteriormente la calidad del mallado es casi la misma a diferencia de la zona del difusor donde se puede observar que existe cierta deformación y el prism layer del suelo es ligeramente modelado a la nueva curvatura del difusor (véase Figura 107 y Figura 108).



*Figura 107 Mallado superficial (Caso difusor original)*



*Figura 108 Mallado volumétrico (Caso difusor original)*

Los residuos logrados (véase Figura 109) no acaban de converger en el rango que se desea, esto probablemente es debido a las turbulencias provocadas en la salida del difusor que no permiten alcanzar un estado constante de las variables. Como se observa, todos los valores tienen un adecuado residuo a diferencia de las ecuaciones de

momento en “y” y “z”. Aun así, se han extraído los datos para ser comparados con el resto teniendo en cuenta que existe una ligera variación de ellos.

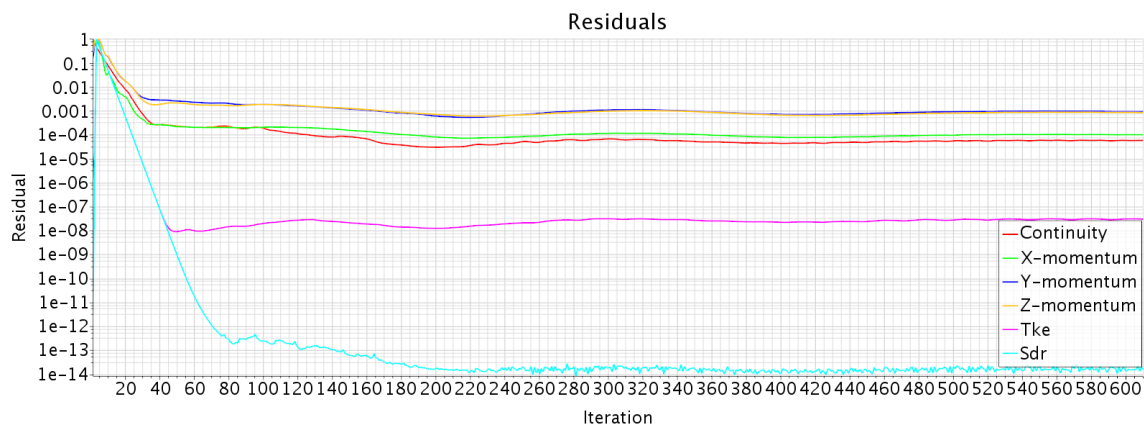


Figura 109 convergencia de los residuos (Caso difusor original)

El diagrama de fuerzas de drag y lift se puede ver en la Figura 71, ya que en este y en el resto de casos la convergencia es la misma, posteriormente se indicarán los resultados simulados.

La velocidad en la parte superior de este caso (véase Figura 110 y Figura 111) mantiene una distribución muy similar a la del caso sin difusor. El perfil de la estela ahora varia creando una fluctuación ascendente hasta permanecer constante a 5 metros de haberse desprendido del coche. No obstante, ha aminorado la sección de velocidad casi nula entorno a un 50%.

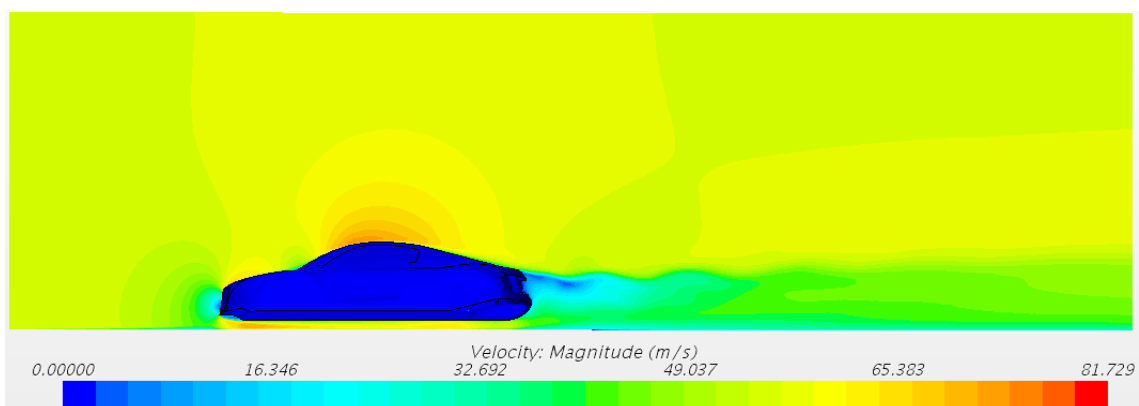
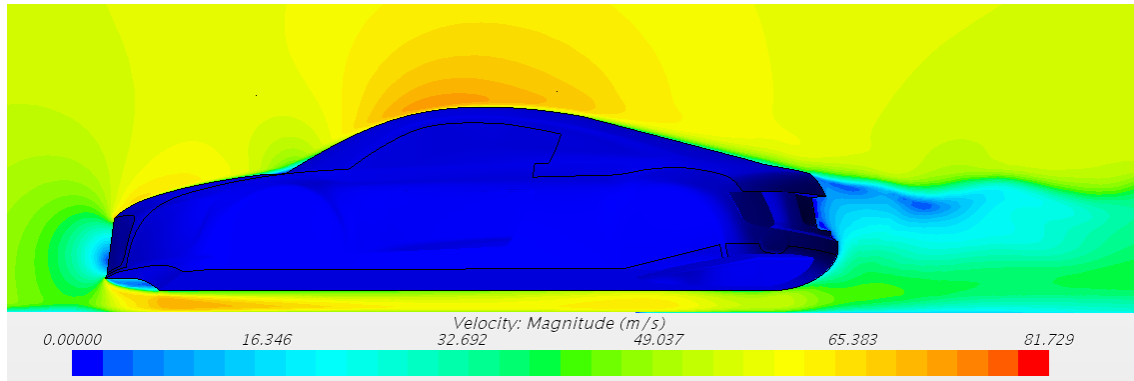


Figura 110 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso difusor original)

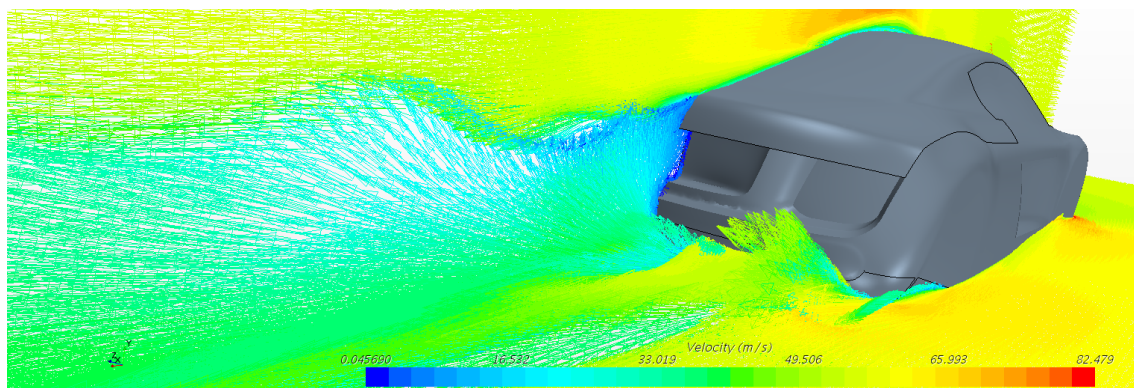




*Figura 111 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso difusor original)*

La velocidad bajo el suelo no varía apenas en el área observado donde se muestra lo sucedido en la sección central del coche.

En cambio, en las imágenes representadas con vectores (Figura 112 - Figura 114) se puede ver una gran expansión en la salida del difusor donde se esparce tanto hacia arriba como hacia abajo a una velocidad bastante alta (50 m/s), obteniendo un no del todo adecuado perfilamiento de las velocidades. El esparcimiento del flujo justo en la salida del difusor no favorece a crear el volumen de alta presión en la zona deseada, sino que se perjudica. Aun así, la variación de velocidad es más progresiva que la anterior y esto ayuda a mejorar la creación de alta presión más alejada de la parte baja.



*Figura 112 Flujo del aire global en modo vector (Caso difusor original)*

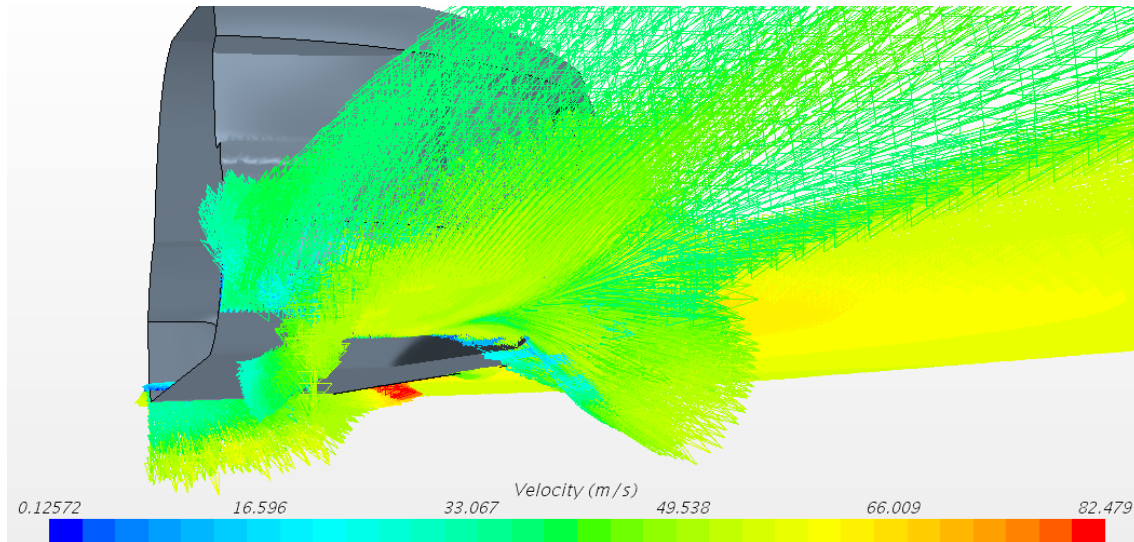


Figura 113 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso difusor original)

En la Figura 114 se puede observar lo sucedido justo encima del difusor. A pesar de arremolinarse tan bruscamente en un bucle la sección de velocidad casi nula no es aparentemente distinta a la de la sección central del coche y el volumen de alta presión que se crea es menor que en el caso sin difusor.

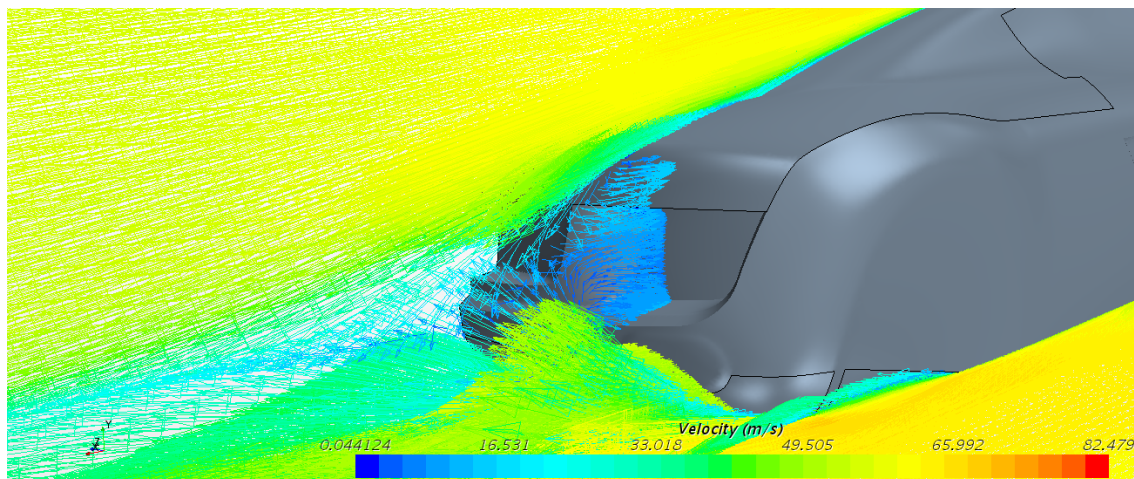


Figura 114 Flujo del aire en la salida del difusor en modo vector (Caso difusor original)

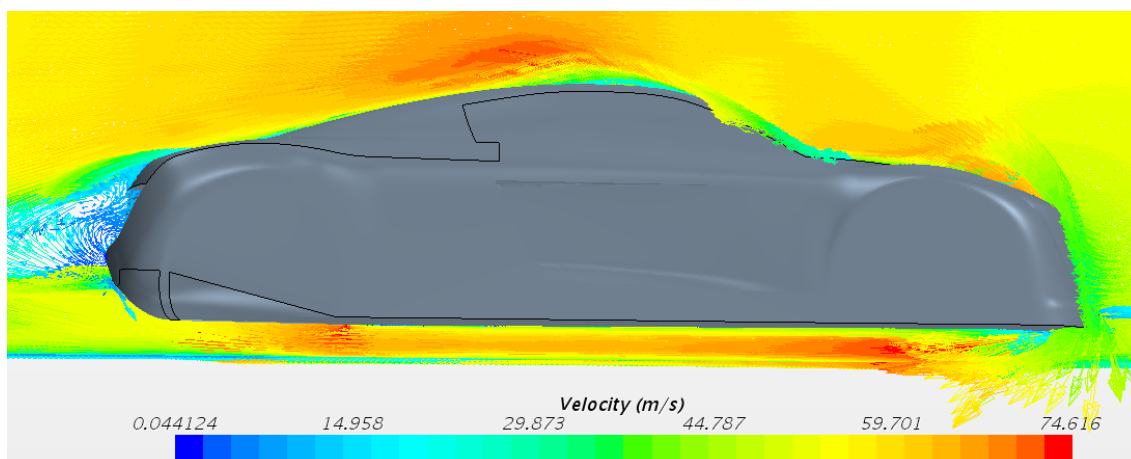


Figura 115 Flujo del aire en la sección envolvente del difusor en modo vector (Caso difusor original)

Sin embargo, el flujo que pasa a través de la sección del difusor (Figura 115) se ha incrementado en gran medida alcanzando velocidades cerca de los 70 m/s, lo que beneficia a la succión del cuerpo. Además, se aprecia todavía más como el gradiente de velocidades es más homogéneo en la salida. Este fenómeno afecta a la parte superior obligándola a reducir su velocidad y por consiguiente aumentar la presión.

En cuanto a las presiones obtenidas (Figura 116 - Figura 118), se observa que se han desarrollado mejor como se venía diciendo con la distribución de velocidades, la alta presión se ha separado del difusor alcanzando unos 700 Pa en la tonalidad más anaranjada y entorno 500 Pa en la anaranjada clara mientras que la amarillenta está en los 150 Pa.

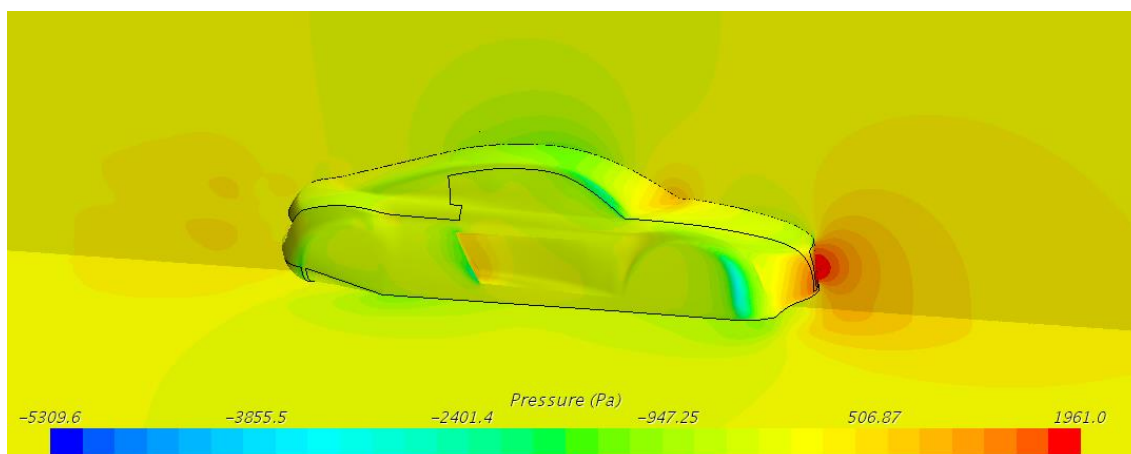


Figura 116 Presión relativa entorno el coche (Caso difusor original)

Por otro lado, la presión bajo el suelo alcanza los -1200 Pa en el vértice con el difusor y acaba saliendo aproximadamente a la atmosférica. Tal y como se ha explicado en apartado anteriores, justo la entrada de sección del suelo y en la del difusor es donde ocurren las menores presiones.

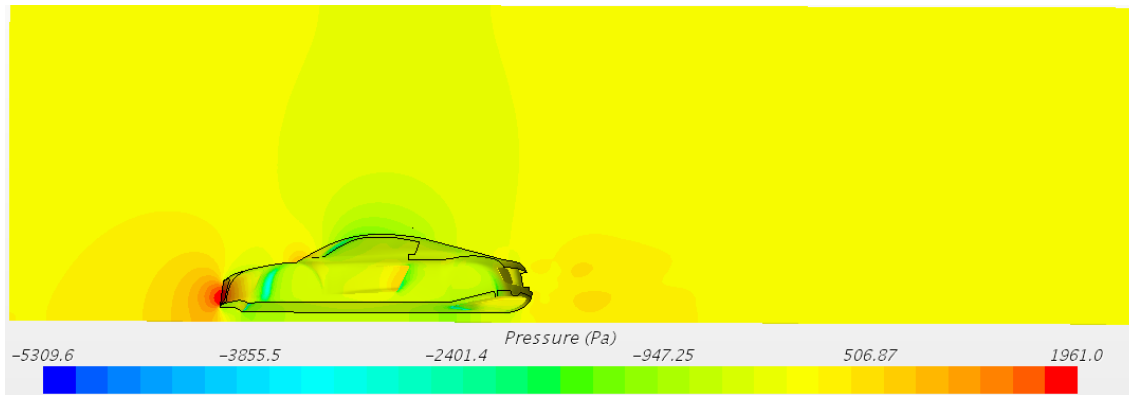


Figura 117 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso difusor original)

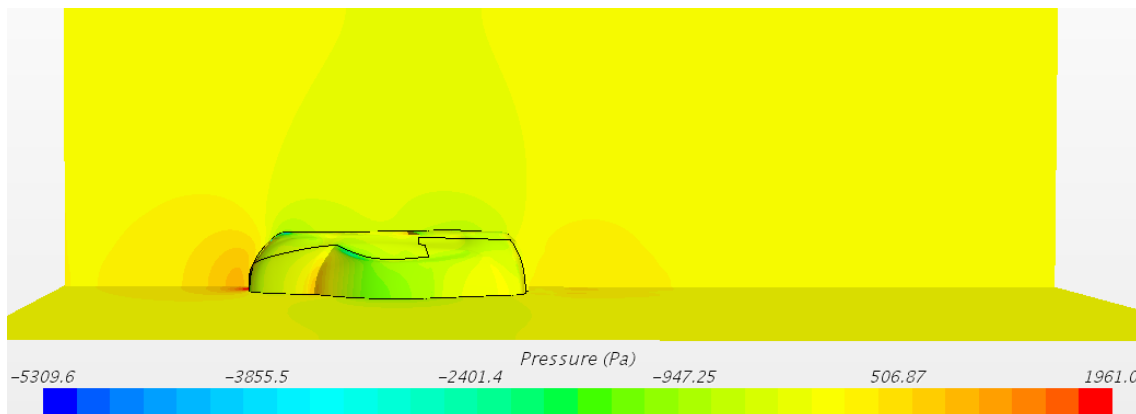


Figura 118 Presión relativa del dominio vista planta (Caso difusor original)

Nuevamente, para comprobar que si realmente sucede una sustentación o una succión hacia el asfalto se extraen los datos en las siguientes tablas (véase Tabla 6)

Parts	Pressure (Pa)
Diffuser	-662,685
Rest of car	-356,331
Roof	-486,987
<b>Totals</b>	<b>-502,116</b>

Tabla 6 Presión del vehículo (Caso difusor original)



Esta vez la diferencia ha aumentado gracias a una reducción de la presión en la parte baja y, a causa de ello, un aumento de la parte superior resultando una diferencia de 165,698 Pa, 83,5 Pa más que el anterior (101% más). De esta manera se conoce que se obtiene una succión hacia el asfalto.

Para saber la magnitud de dicha succión, se observan las tablas (Tabla 7 y Tabla 8) y además se ha de tener en cuenta la resistencia al avance que se sufre por este cambio y si esto acaba siendo un beneficio o un inconveniente.

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	-385.606,300	-0,229	-385.606,500
Rest of car	7.7937,600	0,919	77.938,520
Roof	306.971,700	2,369	306.974,100
Totals	-697,021	3,059	<b>-693,962</b>

Tabla 7 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor original)

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	12.927,920	19,582	1.2947,500
Rest of car	-5.978,275	21,179	-5.957,097
Roof	-6.723,203	22,965	-6.700,239
Totals	226,443	63,725	<b>290,168</b>

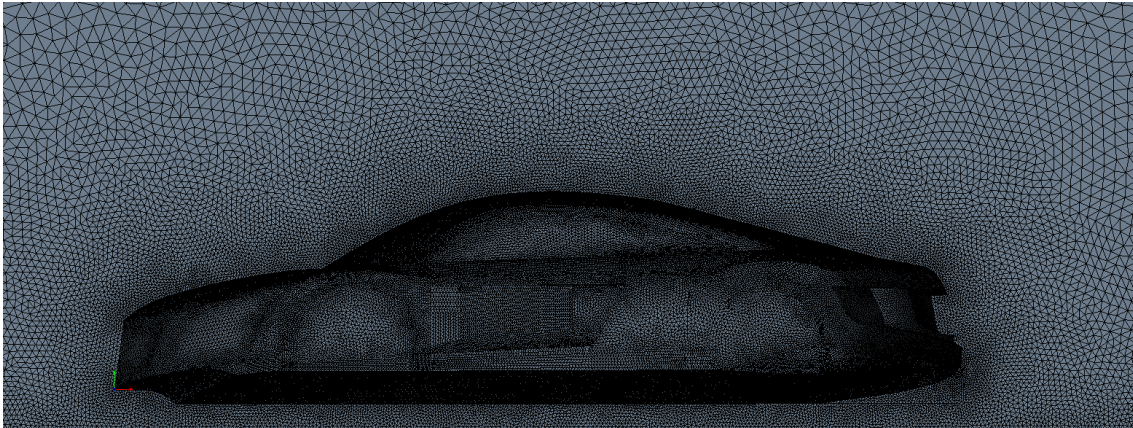
Tabla 8 Fuerza drag del vehículo (Caso difusor original)

Los resultados son 693,962 N de downforce y 290,168 N de drag, la diferencia de introducir este difusor y no utilizar nada es un 96% más. A pesar de también haber aumentado el drag, este solo ha crecido un 10%, variación ínfima en comparación al incremento de la downforce. Por lo tanto, es modelo se considera adecuado.

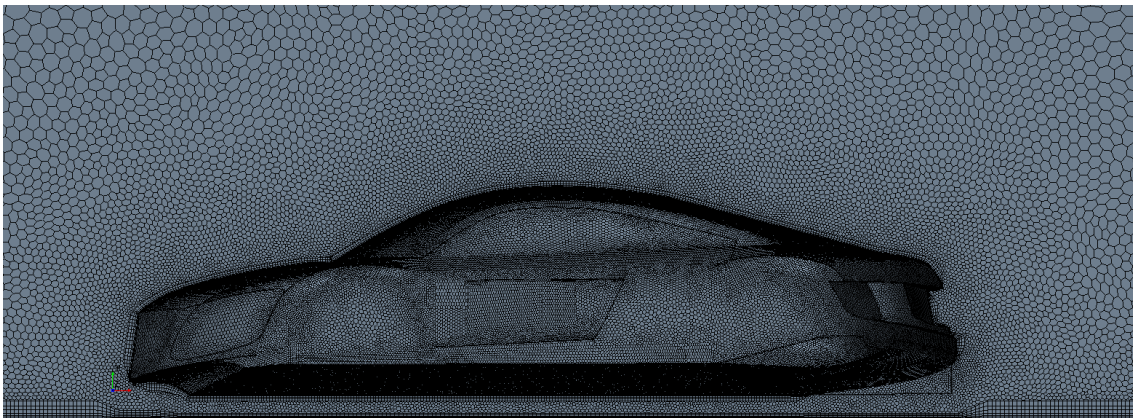
#### 5.4.3. Caso 2 (Difusor aletas rectas)

De la misma manera que en el anterior, en el segundo caso (véase Figura 119, Figura 120) el prism layer del suelo se ve remodelado nuevamente creciendo una vez la geometría del difusor ha finalizado. Por otro lado, el prism layer del difusor también se

ve influenciado por la nueva geometría que ahora en vez de ser deformada hacia dentro lo hace hacia el exterior en forma de láminas. Se puede observar una línea formando un triángulo rectángulo en la Figura 120 en la que se delimita dichas láminas.



*Figura 119 Mallado superficial (Caso aletas rectas)*



*Figura 120 Mallado volumétrico (Caso aletas rectas)*

Los residuos en este caso (Figura 121) a diferencia del anterior, si alcanzan valores por debajo del  $1 \cdot 10^{-4}$ , descendiendo hasta los  $1 \cdot 10^{-5}$ , baremo muy adecuado para recoger valores. Tal y como se ha mostrado, las turbulencias en la salida no han sido tan bruscas sino más tangenciales a la geometría del difusor lo que ha favorecido la buena convergencia.

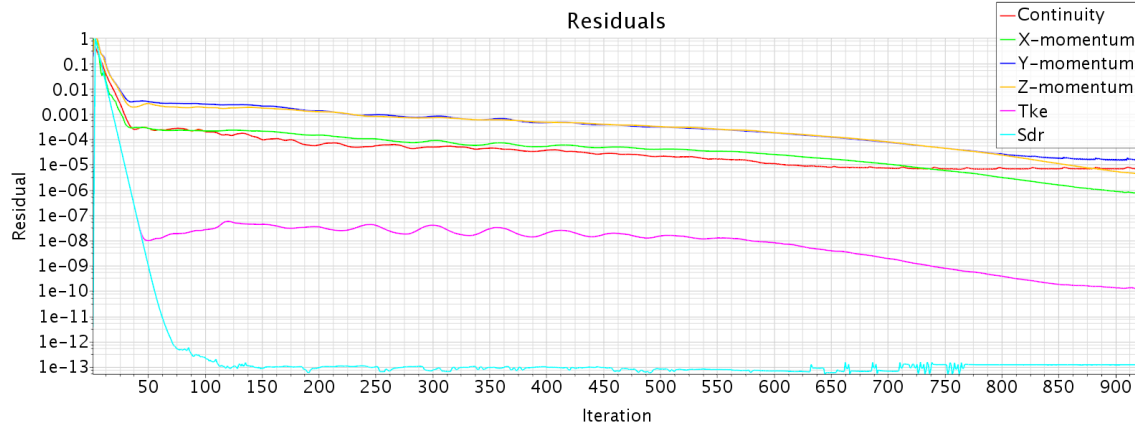


Figura 121 Convergencia de los residuos (Caso aletas rectas)

Volviendo a visualizar los resultados, para el caso de las velocidades (Figura 122 - Figura 126), se ve una homogeneidad de la velocidad entrante que continua por todo el dominio aun después de verse perturbada por la estela del coche. En cuanto al flujo de aire que circula bajo el coche se observa como nuevamente los puntos de velocidad máxima (aproximadamente 70 m/s) se sitúan en las entradas del suelo y del difusor.

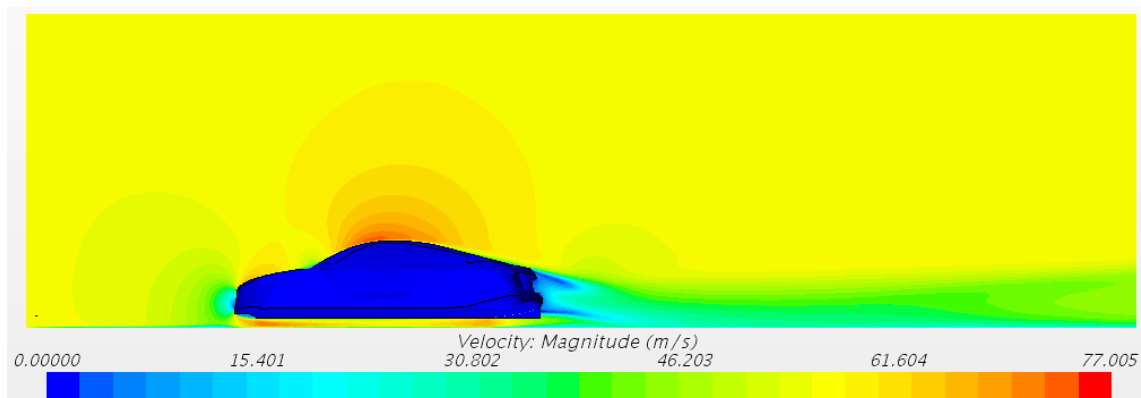


Figura 122 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso aletas rectas)

La estela ahora presente se vuelve a ver formada por una velocidad casi nula nuevamente por debajo del difusor, lo que quiere decir que existe un desprendimiento de la capa limite por una geometría no adaptada al flujo, se debería de remodelar el perfil del difusor haciendo desaparecer esa velocidad nula.

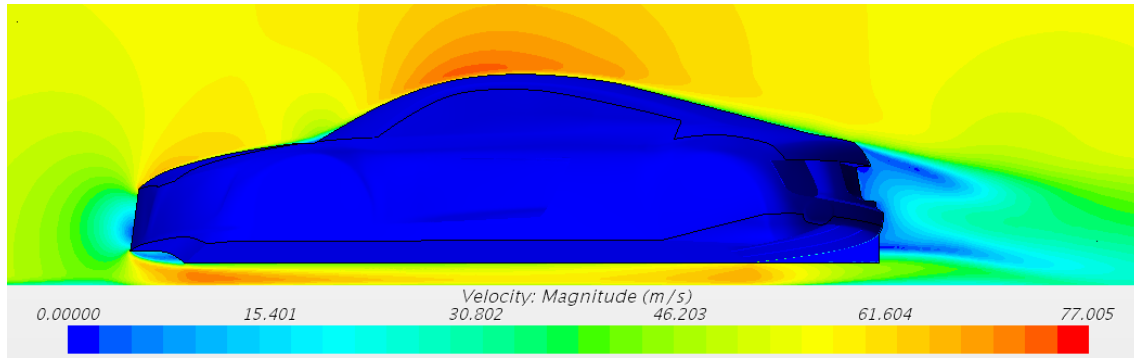


Figura 123 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso aletas rectas)

A continuación, se observa como el vacío creado bajo el difusor, del que se hablaba, tan solo se trata de una pequeña veta en la esquina de la aleta central, alrededor de esta la velocidad es muy baja pero que va aumentando en cuanto se acerca a la siguiente aleta. A partir de ahí las siguientes aletas presentan una velocidad entorno 55 m/s.

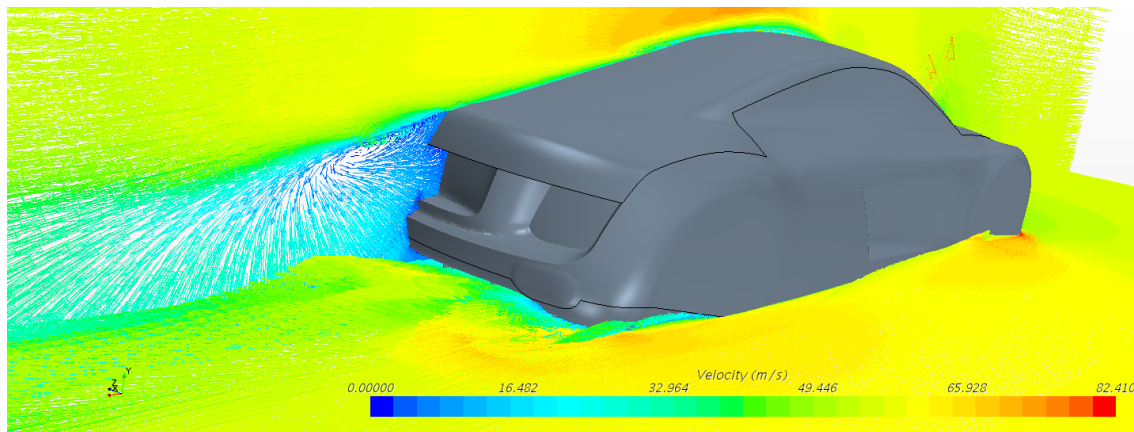
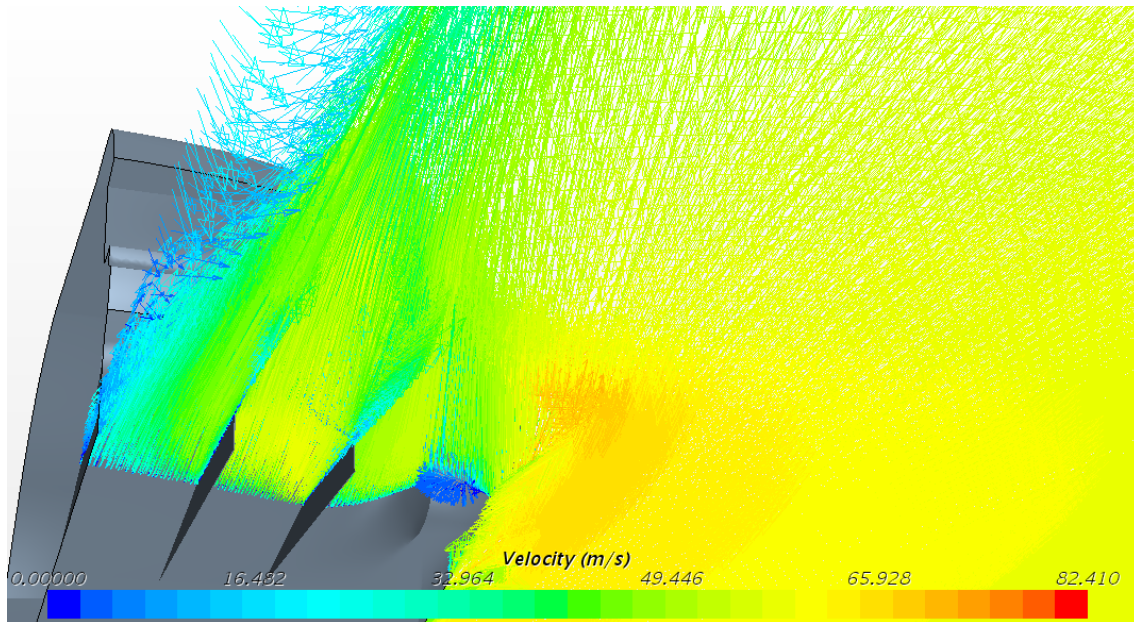


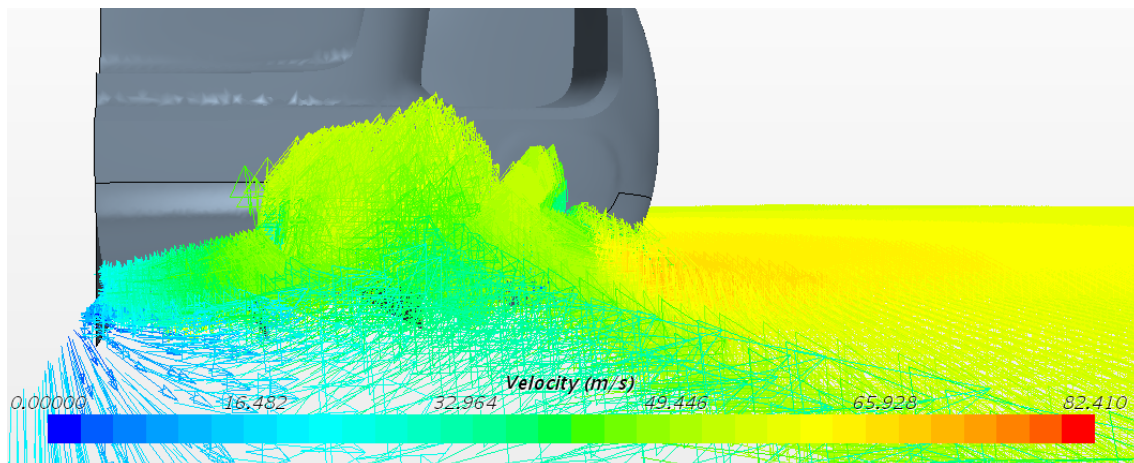
Figura 124 Flujo del aire global en modo vector (Caso aletas rectas)

Seguidamente en la Figura 125, se puede ver como las aletas ayudan a alejar el flujo del difusor y evitando, en lo posible, las turbulencias en el interior dispersándolas en línea recta. Finalmente, esta estela acaba convergiendo en un chorro oprimido por la presión generada por la aleta central y por el flujo del exterior.





*Figura 125 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso aletas rectas)*



*Figura 126 Flujo del aire vista superior en modo vector (Caso aletas rectas)*

En cuanto a la presión (Figura 126 - Figura 130) muy similar a los otros casos a excepción de la estela que forma una distribución de presiones que varía de los 900 Pa, con la tonalidad más anaranjada, a la atmosférica de color amarillo.

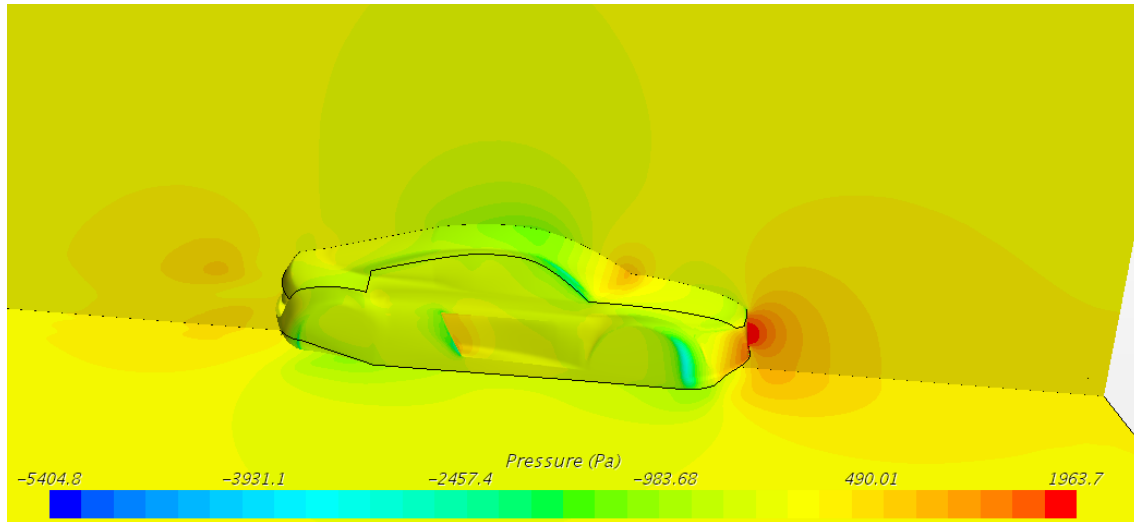


Figura 127 Presión relativa entorno el coche (Caso aletas rectas)

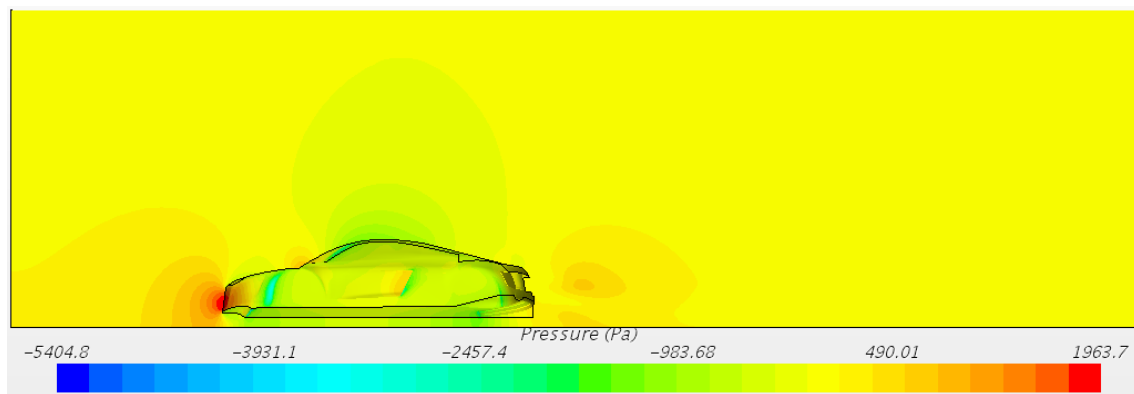


Figura 128 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso aletas rectas)

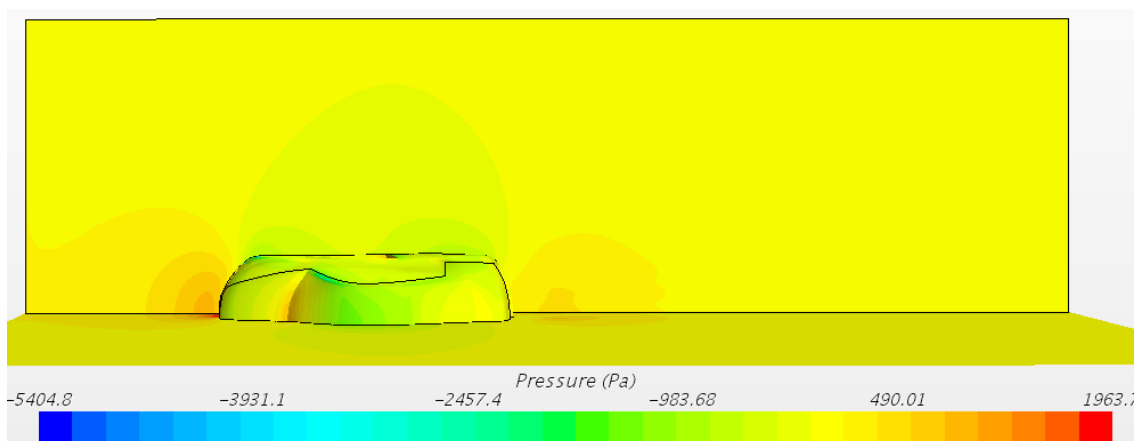


Figura 129 Presión relativa del dominio vista planta (Caso aletas rectas)

En la Figura 130 se aprecia cómo se incrementa progresivamente la presión a medida que se acerca a la salida. Por otro lado, la aleta central (la de la izquierda del todo)

alcanza una mayor presión justo en la salida donde yacía la velocidad casi nula que se había mencionado anteriormente.

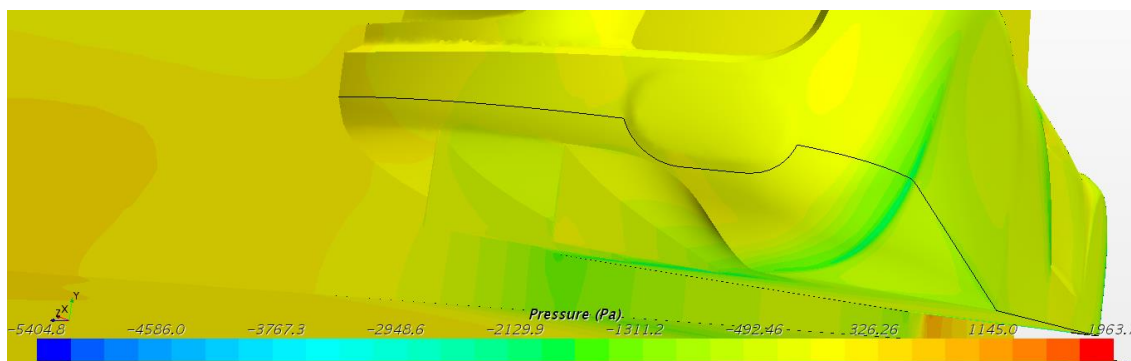


Figura 130 Presión relativa en el difusor (Caso aletas rectas)

Está claro que viendo las representaciones anteriores va haber una downforce, aun así, se va a volver a calcular el rango con el que varía respecto el primer caso (véase Tabla 9).

Parts	Pressure (Pa)
Diffuser	-684,456
Rest of car	-353,460
Roof	-499,498
Totals	<b>-511,515</b>

Tabla 9 Presión del vehículo (Caso difusor aletas rectas)

En este caso las presiones han aumentado todavía más en comparación al anterior, la cuestión de saber si este incremento es favorable respecto a los demás se describirá en las conclusiones. Nuevamente, la diferencia de presión entre las superficies superior e inferior es de 184,958 Pa, 102,715 Pa más que el anterior (125% más). De esta manera se conoce que se obtiene una succión hacia el asfalto, como era lógico.

La magnitud de dicha succión, se observa en las tablas (Tabla 10 y Tabla 11) y además se tiene en cuenta la resistencia al avance que sufre por este cambio.

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	-386.660,800	0,358	-386.660,400
Rest of car	93.773,780	1,163	93.774,940
Roof	292.067,500	2,173	292.069,700
<b>Totals</b>	<b>-819,488</b>	<b>3,693</b>	<b>-815,795</b>

Tabla 10 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor aletas rectas)

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	12.928,950	20,345	12.949,300
Rest of car	-7.881,817	22,385	-7.859,432
Roof	-4.803,556	21,502	-4.782,054
<b>Totals</b>	<b>243,580</b>	<b>64,233</b>	<b>307,813</b>

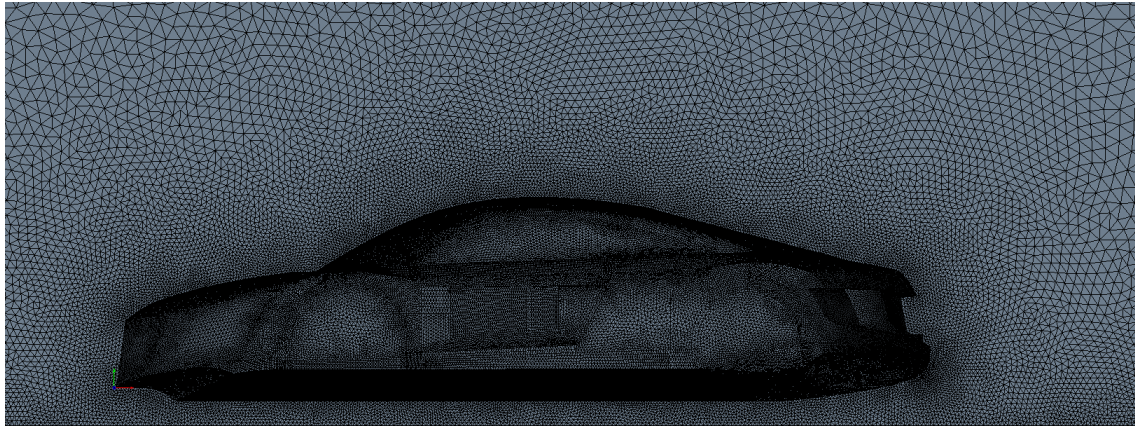
Tabla 11 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor aletas curvadas)

Los resultados son 815,795 N de downforce y 307,813 N de drag, la diferencia de introducir este difusor y no utilizar nada es un 131% más. El incremento del drag ha sido de un 17%, a pesar de ser mayor en este caso son valores muy bajos de incremento. Por ello el modelo se considera adecuado y mejor que el anterior.

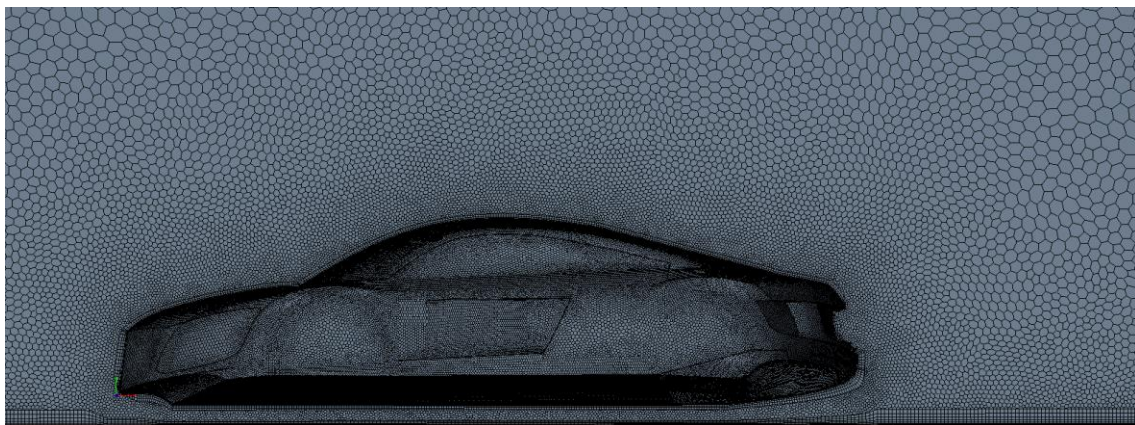
#### 5.4.4. Caso 3 (Difusor aletas curvadas)

Finalmente, en el tercero de los casos con difusor (véase Figura 131 y Figura 132), en un primer vistazo, parece no haber ningún tipo de láminas que sea delimitada en la Figura 132, pero eso es porque no existe ninguna en la sección que se está viendo que es justo en el medio del coche, pero, en esta sí que se puede apreciar la curvatura dada en los dos últimos casos diferente de los dos primeros.



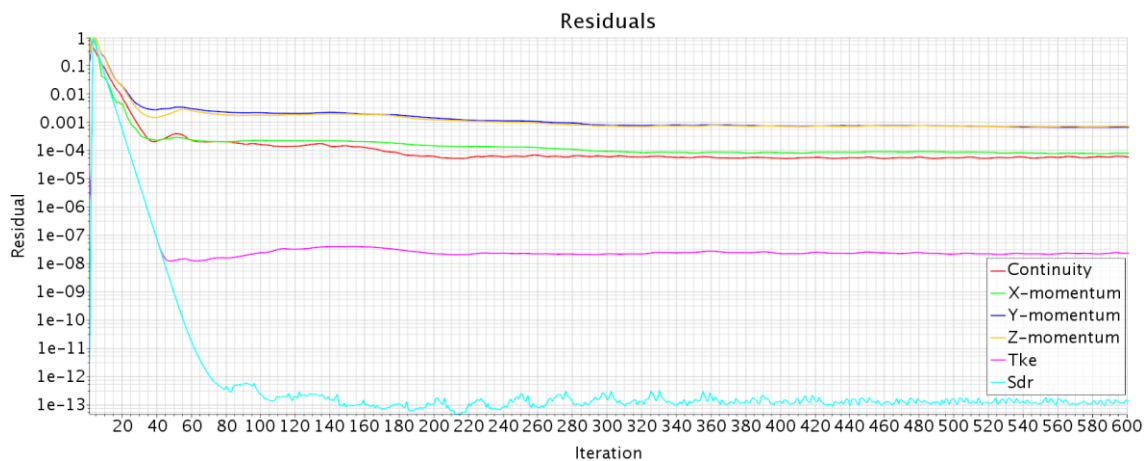


*Figura 131 Mallado superficial (Caso aletas curvadas)*



*Figura 132 Mallado volumétrico (Caso aletas curvadas)*

Volviendo a los residuos (véase Figura 133), estos les suceden igual que el caso del difusor original, en el que la complejidad de las turbulencias no favorece a menguar los residuos. En este caso las iteraciones simuladas han sido recortadas a 600 ya que el estudio se mantuvo en la misma línea hasta las 1400 iteraciones.



*Figura 133 Convergencia de los residuos (Caso aletas curvadas)*

Los resultados de velocidad en este caso ofrecen una peculiar estela que se ve partida, formando dos áreas de velocidad casi nula, debido a que en este caso no ha habido un desprendimiento de la capa límite en el plano observado. El flujo ha sido despedido como un chorro, a 55 m/s, arrastrando así las partículas cercanas al suelo y creando de esta forma un vacío. Este fenómeno tampoco favorece al diseño óptimo, ya que se crea una alta presión que puede provocar sobreviraje.

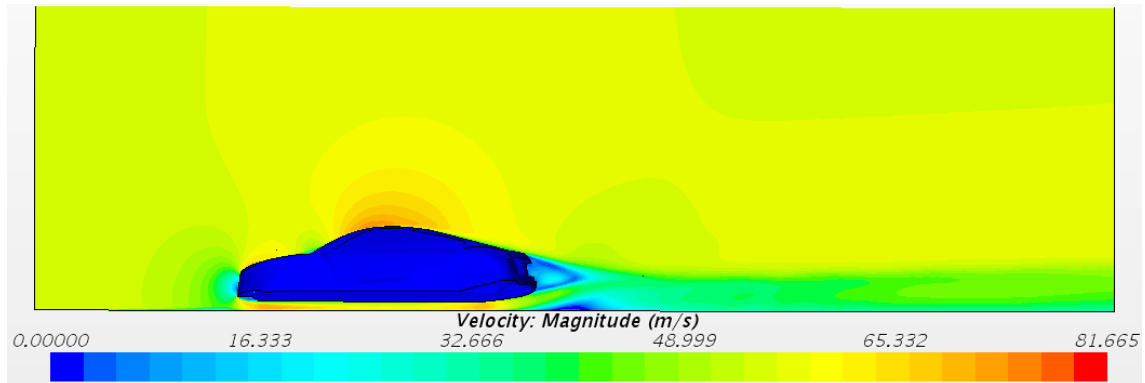


Figura 134 Velocidad del aire en todo el dominio (Caso aletas curvadas)

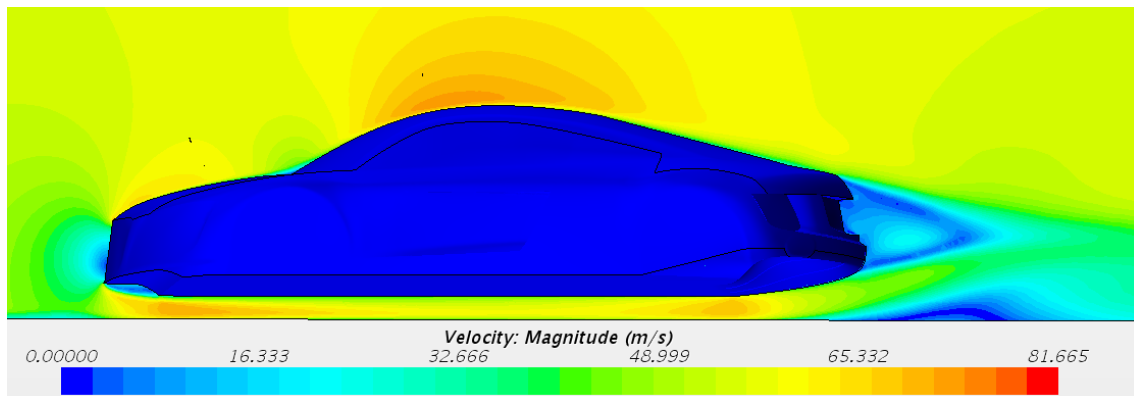
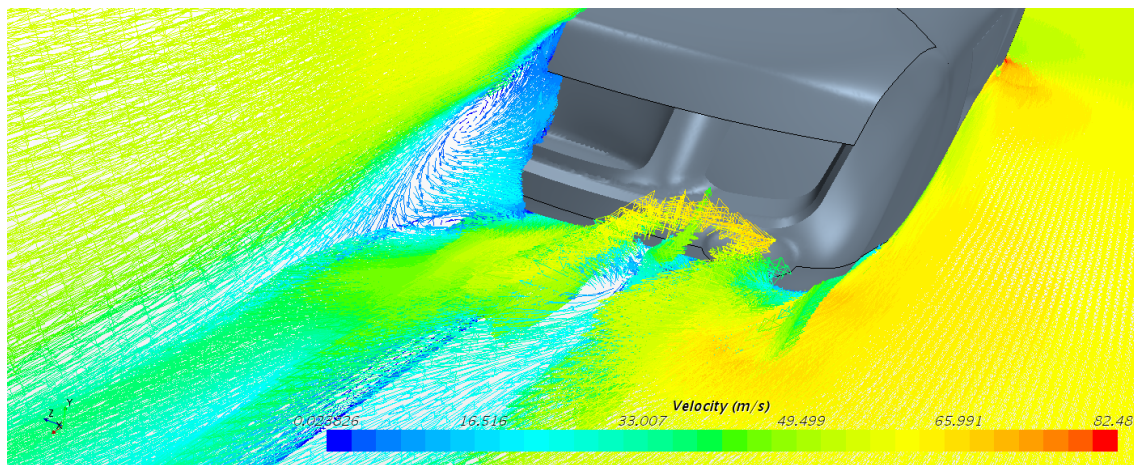


Figura 135 Velocidad del aire alrededor del coche (Caso aletas curvadas)

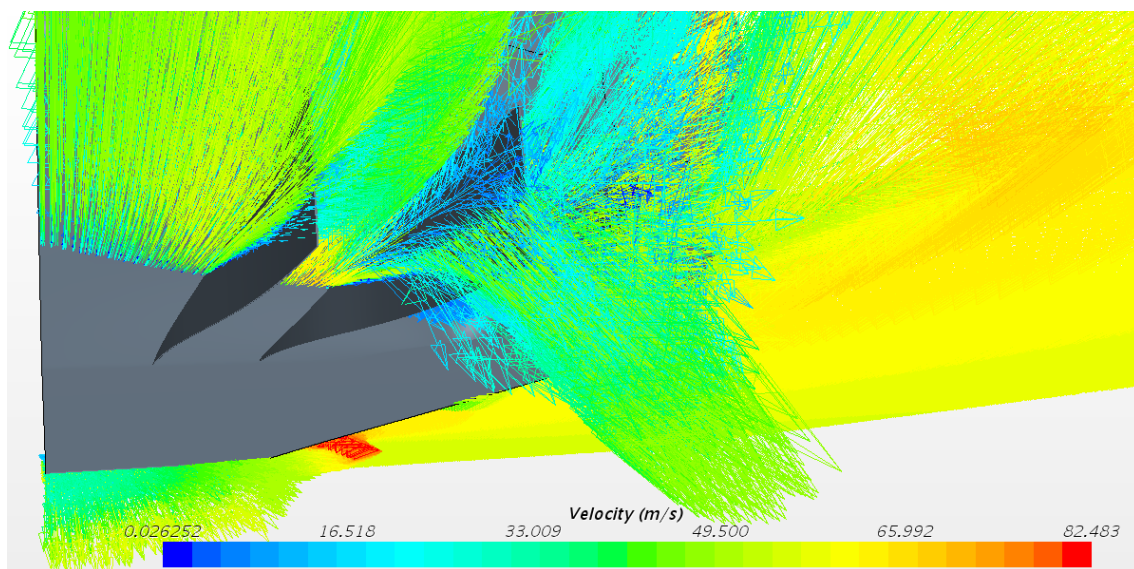
En la siguiente imagen se aprecia lo que sucede detrás del plano central y es un mal diseño del difusor, se han creado bucles de velocidad nula que distorsiona el flujo de aire. Tal y como se puede ver, los vectores de la velocidad de la segunda aleta son los afectados por la excedida curvatura de la aleta, siendo empujados en contra de la salida, de ahí que atravesasen, solo visualmente, el sólido.





*Figura 136 Flujo del aire global en modo vector (Caso aletas curvadas)*

No por eso, son los más afectados, sino que en la Figura 137 se puede observar como el hueco entre la segunda aleta y la cara interior del difusor más a la derecha se forma un bucle enorme por una excesiva curvatura que no dibuja bien la trayectoria del flujo en su interior, resultando así una dispersión total de los vectores de velocidad.



*Figura 137 Flujo del aire bajo el coche en modo vector (Caso aletas curvadas)*

En la Figura 138, se observa como gran cantidad de flujo adherido a la segunda aleta, es despedido con una tan baja velocidad que se vuelve a introducir en la concavidad derecha entorpeciendo todo el flujo extraído por ese hueco gracias a la gran presión generada en esa región.

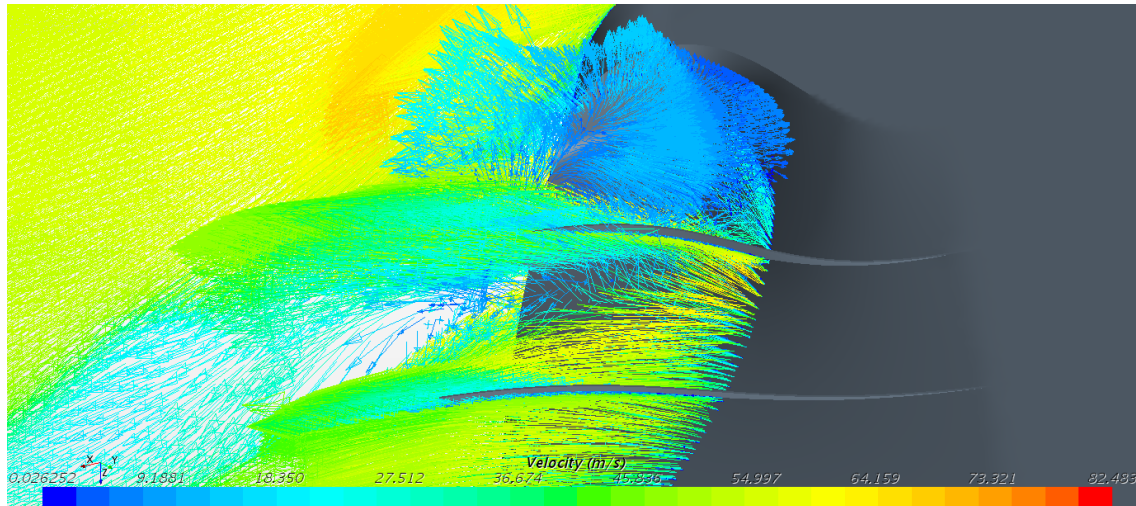


Figura 138 Flujo del aire turbulento bajo el coche en modo vector (Caso aletas curvadas)

La presión máxima en la estela alcanza los 800 Pa donde se arremolinan formando esa mancha amarilla un poco deformada en la salida en la vista en planta. Ha diferencia de eso se tiene una presión atmosférica más homogeneizada por el dominio que en otros casos.

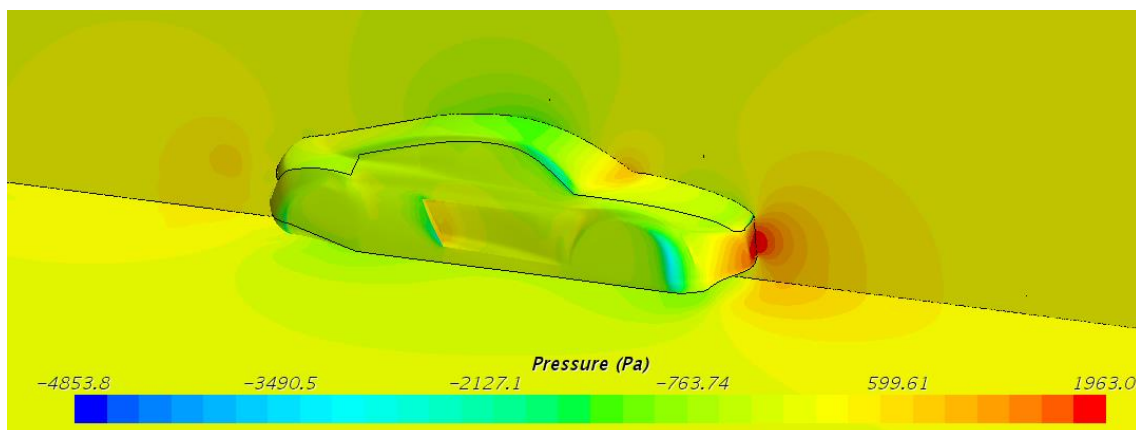


Figura 139 Presión relativa entorno el coche (Caso aletas curvadas)

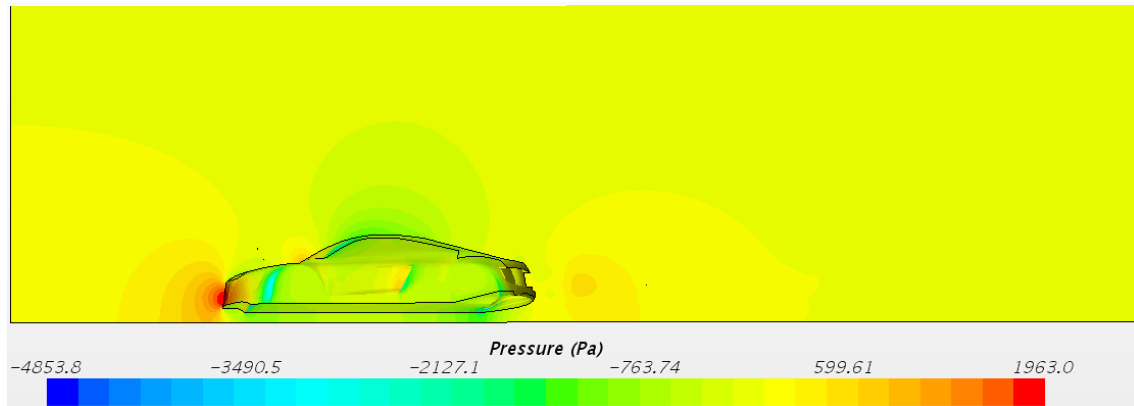


Figura 140 Presión relativa del dominio vista perfil (Caso aletas curvadas)

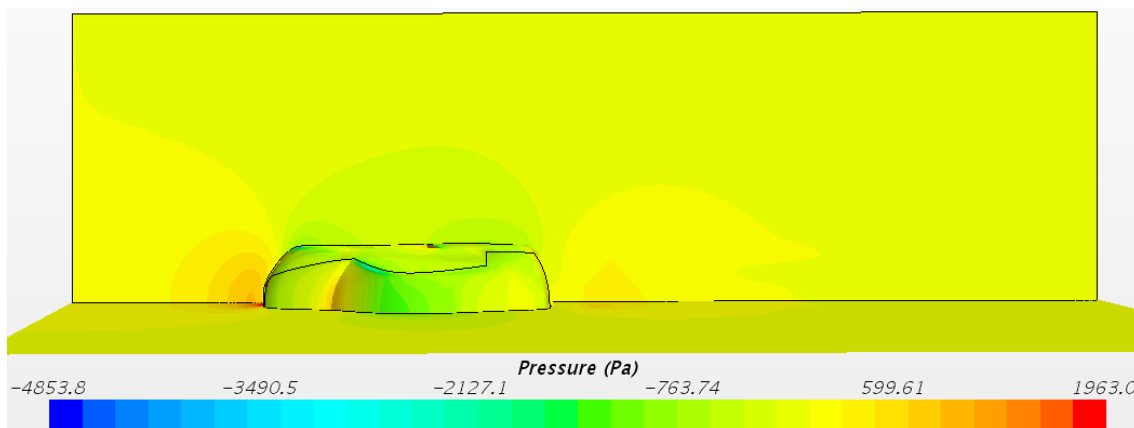


Figura 141 Presión relativa del dominio vista planta (Caso aletas curvadas)

Como se aprecia en la Figura 142, se origina una baja presión justo en la entrada de la segunda aleta y observando toda la entrada del difusor también se puede ver en un color verdoso, que ronda los -1800 Pa, que indica como la velocidad en ese punto se ha incrementado desmesuradamente propiciando una gran carga aerodinámica

Se origina en toda la entrada del difusor, en color verdoso, una gran depresión de unos -1800 Pa, seguida de esta, en la segunda aleta, se puede apreciar un pico de baja presión, de aproximadamente -4850 Pa, que indican que la velocidad en ese punto ha incrementado desmesuradamente obteniendo una gran carga aerodinámica, todo esto gracias a la geometría inicial.

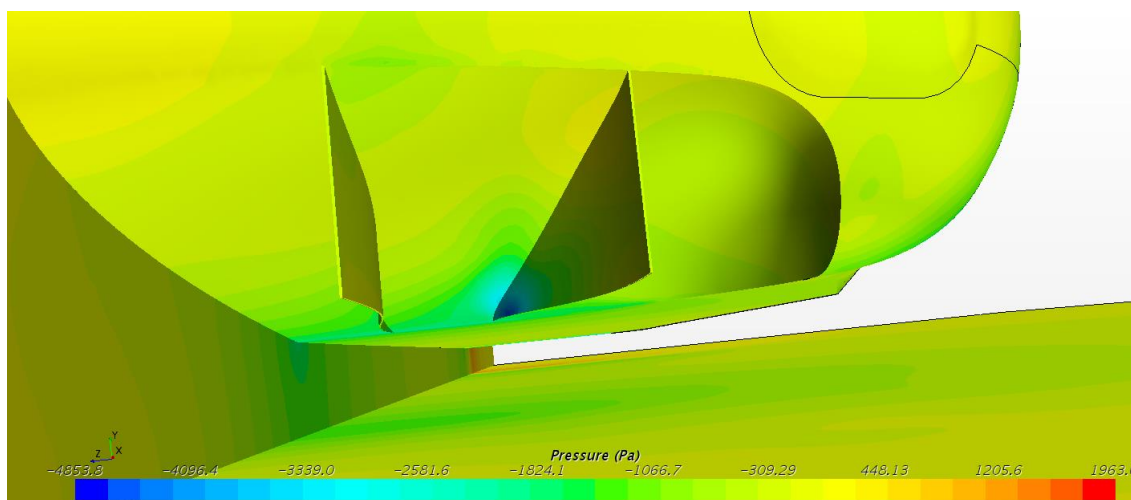


Figura 142 Presión relativa en el difusor (Caso aletas curvadas)

Desafortunadamente, no ocurre lo mismo en el resto de la geometría, donde se observa como el gradiente de presión ha ido aumentando de forma muy poco progresiva encauzando ciertas turbulencias como se han podido ver en imágenes anteriores de los vectores de velocidad. Por ello, se debería de remodelar la geometría con la que se perfila la capa límite, para que esta no se desprenda y cree un flujo más organizado.

Por último, se cuantifican los datos resultantes de presión en la Tabla 12.

Parts	Pressure (Pa)
Diffuser	-659,382
Rest of car	-345,968
Roof	-497,232
<b>Totals</b>	<b>-499,856</b>

Tabla 12 Presión del vehículo (Caso difusor aletas curvadas)

La diferencia de presiones entre la sección Diffuser y la Roof es de 162,150 Pa, 79,907 Pa más que sin difusor (97% más). Como en todas las anteriores se ha vuelto a diseñar un difusor que ayuda a adherir el coche en el asfalto.

La magnitud de las fuerzas resultantes del diseño se observa en las tablas (Tabla 13 y Tabla 14).

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	-386.540,300	0,186	-38.6540,100
Rest of car	93.768,100	1,236	93.769,330
Roof	292.061,600	2,172	292.063,800
Totals	-710,664	3,595	<b>-707,070</b>

Tabla 13 Fuerza lift del vehículo (Caso difusor aletas curvadas)

Parts	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Diffuser	12.954,060	20,183	12.974,250
Rest of car	-7.889,415	22,379	-7.867,036
Roof	-4.805,403	21,487	-4.783,916
Totals	259,2468	64,049	<b>323,296</b>

Tabla 14 Fuerza drag del vehículo (Caso difusor aletas curvadas)

Finalmente, La downforce ha disminuido a 707,070 N respecto al anterior, aunque no sucede lo mismo con el drag, que obtiene un 323,296 causado por las turbulencias en el interior del difusor. La diferencia de introducir este difusor y no utilizar nada es un 100% más. El aumento del drag alcanza la mayor variación de todos los casos con un 23%, este valor empieza a ser notable y seguramente que decisivo para descartarlo como se verá en las conclusiones. A pesar de ello, el difusor cumple con su funcionamiento, mejor o peor, ofreciendo mayor downforce.



## 6. Conclusiones

Mediante la Tabla 15 se pueden sacar conclusiones de cuál es el diseño que mejor ha resultado de los casos actuales. Afortunadamente, todos han logrado alcanzar valores por encima del mínimo, que es no llevar difusor.

	Casos			
	Sin difusor	Original	Aletas rectas	Aletas curvadas
<b>Presión Superior (Pa)</b>	-502,365	-496,987	-499,498	-497,232
<b>Presión Inferior (Pa)</b>	-584,608	-662,685	-684,456	-659,382
<b>Diferencia de presión (Pa)</b>	82,243	165,698	184,958	162,150
<b>Downforce (N)</b>	353,211	693,932	815,795	707,070
<b>Drag Force (N)</b>	263,838	290,168	307,813	323,296

Tabla 15 Tabla comparativa de los resultados de los diferentes casos

Comenzando por la diferencia de presiones logradas, se distingue con diferencia el de aletas rectas con 184,958 Pa. Este diseño es el que ha conseguido mayor depresión en la parte baja, seguido del original con 165,698 Pa. Esto indica que el área de entrada del difusor y/o la geometría de este, han ayudado a favorecer el incremento de velocidad en el vértice del difusor disminuyendo así la presión en esa zona.

Analizando ahora la downforce, con un valor de 815,795 N el difusor con aletas rectas es el que más carga aerodinámica ha alcanzado, y con diferencia, seguido de las aletas curvadas y el difusor original que prácticamente han alcanzado la misma carga. La diferencia tan grande en comparación al resto, indica que el flujo ha sido extraído de una forma más óptima, sin tantas turbulencias como han padecido los demás casos.

Con esta prueba inicial no queda tan claro que difusor sería el más conveniente para el modelo escogido. Se debería de modificar las zonas defectuosas y entonces



seguramente se vería una disputa más equilibrada entre los dos últimos casos con mayores magnitudes de carga aerodinámica.

Por otro lado, la fuerza del drag se ha visto aumentada por todos, aunque con menor diferencia en el difusor original con un valor de 290,168 N, pero no muy lejos se ha quedado el de aletas rectas con una diferencia de 17 N y, por último, el de aletas curvadas con una diferencia de 33 N, que por culpa del flujo remanente en el tercer hueco ha perdido gran de su potencial y se ha sumado resistencia al avance.

Finalmente, juzgando únicamente esta prueba inicial, el difusor con un mejor comportamiento ha sido el de aletas rectas. La downforce ejercida es enormemente superior a los demás por lo que compensa esa pequeña diferencia de drag respecto el original. Gracias a eso el paso por curva puede tomarse a mayor velocidad, mientras que en paso por recta perdería tiempo respecto el original y el caso sin difusor.

## 7. Planes de futuro

Para un futuro, se tienen pensado varios cambios para mejorar el diseño:

### 1.- Mejora de los difusores.

- El caso del difusor original  
Mejorar la geometría para evitar el esparcimiento del flujo, de manera que parezca un chorro casi bien recto.
- El caso del difusor con aletas rectas  
Mejorar el perfil con el que se describe para no desprenderse de la capa límite hasta llegar al final del difusor.
- El caso del difusor con aletas curvadas  
Reducir la curvatura de la segunda aleta y sobre todo de la concavidad de la parte derecha, además de un cambio de perfil que mejore el desprendimiento de la capa límite.

## 2.- Difusor soplado.

Recoger el aire de las zonas de menor velocidad en la parte baja y extraerlas, mediante conductos, por encima del difusor para crear mayor presión al exterior.

## 3.- División del fondo plano.

Para aumentar la velocidad en todo el suelo se podría crear toda una sección que tuviese una altura menor a la del resto del fondo plano, logrando que el aire que entrase se le pudiese variar la sección y beneficiarse de una depresión donde mejor conviniese mejorando la dinámica del coche (véase Figura 143).



*Figura 143 Fondo plano con elevación en el eje central [34]*

## 4.- Introducir mayor número de aletas para los casos que padezcan de muchas turbulencias.

Los casos difíciles de controlar se les puede añadir más aletas con el fin de organizar mejor cada franja evitando que las turbulencias que se creen entorpezcan al resto.

## 5.- Mejorar la entrada del coche para que la entrada sea más progresiva y entre el flujo más limpio.

Como se ha visto en multitud de imágenes, la entrada tiene un canto seco de  $45^\circ$ , para mejorarlo se debería de aumentar el ángulo y así el flujo de aire incidiría no tan bruscamente, e incluso alerones delanteros que proporcionen un flujo laminar y mayor cantidad de flujo.

## 8. Anexo

### 8.1. Ecuaciones de transporte

- K-epsilon Standard y two layers

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (v - v_g) da \\ = \int_A (\mu + \mu_t) \nabla k da + \int_V [G_k + G_{nl} + G_b - \rho((\varepsilon - \varepsilon_0) \\ + Y_M) + S_k] dV \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \varepsilon dV + \int_A \rho \varepsilon (v - v_g) da \\ = \int_A (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \nabla \varepsilon da \\ + \int_V \frac{1}{T} [1,44(G_k + G_{nl} + C_{\varepsilon 3} G_b) - 1,92\rho((\varepsilon - \varepsilon_0) \\ + \rho Y_y) + S_\varepsilon] dV \end{aligned} \quad (28)$$

Donde

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$k$ : Energía cinética turbulenta (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)

$\varepsilon$ : Ratio de disipación de energía turbulenta (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)

$\varepsilon_0$ : Turbulencia ambiental (m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>)

$V$ : Volumen de celda (m<sup>3</sup>)

$v$ : Velocidad del fluido (m/s)

$v_g$ : Velocidad del mallado (m/s)

$a$ : Vector de área (m<sup>2</sup>)

$\mu$ : Viscosidad dinámica (kg/m·s)

$\mu_t$ : Relación de viscosidad turbulenta (kg/m·s)

$T$ : Temperatura (K)

$\sigma_\varepsilon$ : Números turbulentos de Schmidt (-)

$C_{\varepsilon 3}$ : coeficiente (-)

$G_k$ : Producción de energía turbulenta (J/m<sup>3</sup>·s)

$G_{nl}$ : Producción de energía turbulenta no lineal (J/m<sup>3</sup>·s)

$G_b$ : Producción de energía turbulenta debido a la flotabilidad ( $J/m^3 \cdot s$ )

$Y_y$ : Término de corrección Yap ( $m^2/s^3$ )

$Y_M$ : Término de disipación de dilatación ( $J/m^3 \cdot s$ )

$S_k, S_\varepsilon$ : Término de fuente ( $J/m^3 \cdot s$ )

- K-Omega Standard

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (v - v_g) da \\ = \int_A (\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k da \\ + \int_V [G_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k] dV \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \omega dV + \int_A \rho \omega (v - v_g) da \\ = \int_A (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega da + \int_V [G_\omega - \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) \\ + S_\omega] dV \end{aligned} \quad (30)$$

Donde

$\rho$ : Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$k$ : Energía cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ )

$V$ : Volumen de celda ( $m^3$ )

$v$ : Velocidad del fluido ( $m/s$ )

$v_g$ : Velocidad del mallado ( $m/s$ )

$a$ : Vector de área ( $m^2$ )

$\mu$ : Viscosidad dinámica ( $kg/m \cdot s$ )

$\mu_t$ : Relación de viscosidad turbulenta ( $kg/m \cdot s$ )

$\omega$ : Ratio específico de la  $k$  ( $s^{-1}$ )

$\omega_0, k_0$ : Turbulencia ambiente ( $s^{-1}$ )

$G_k$ : Producción de energía turbulenta ( $J/m^3 \cdot s$ )

$G_\omega$ : Producción de ratio de disipación específica ( $J/m^3 \cdot s$ )

$S_k, S_\omega$ : Término fuente ( $J/m^3 \cdot s$ )

$f_\beta$ : Término de modificación de estiramiento de vórtices (-)

$f_{\beta^*}$ : Término de modificación sin cortante (-)

$\beta, \beta^*$ : coeficientes (-)

$\sigma_\omega, \sigma_k$ : Números turbulentos inversos de Schmidt (-)

- K-Omega SST

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho k dV + \int_A \rho k (v - v_g) da \\ = \int_A (\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k da \\ + \int_V \gamma_{eff} [G_k - \gamma' \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k] dV \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \omega dV + \int_A \rho \omega (v - v_g) da \\ = \int_A (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega da + \int_V [G_\omega - \rho \beta (\omega^2 - \omega_0^2) \\ + D_\omega + S_\omega] dV \end{aligned} \quad (32)$$

Donde

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

$k$ : Energía cinética turbulenta (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)

$V$ : Volumen de celda (m<sup>3</sup>)

$v$ : Velocidad del fluido (m/s)

$v_g$ : Velocidad del mallado (m/s)

$a$ : Vector de área (m<sup>2</sup>)

$\mu$ : Viscosidad dinámica (kg/m·s)

$\mu_t$ : Relación de viscosidad turbulenta (kg/m·s)

$\omega$ : Ratio específico de la  $k$  (s<sup>-1</sup>)

$\omega_0, k_0$ : Turbulencia ambiente (s<sup>-1</sup>)

$G_k$ : Producción de energía turbulenta (J/m<sup>3</sup>·s)

$G_\omega$ : Producción de ratio de disipación específica (J/m<sup>3</sup>·s)

$S_k, S_\omega$ : Término fuente (J/m<sup>3</sup>·s)

$f_{\beta^*}$ : Término de modificación sin cortante (-)

$\beta, \beta^*$ : coeficientes (-)

$\sigma_{\omega}, \sigma_k$ : Números turbulentos inversos de Schmidt (-)

$\gamma_{eff}$ : Intermitencia efectiva (-)

$\gamma'$ : Coeficiente relativo a la intermitencia efectiva (-)

$D_{\omega}$ : Derivado cruzado ( $J/m^3 \cdot s$ )

#### - Spalart Allamaras

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \tilde{v} dV + \int_A \rho \tilde{v} (v - v_g) da \\ = \frac{3}{2} \int_A (\mu + \rho \tilde{v}) \nabla \tilde{v} da + \int_V [0,622 \rho (\nabla \tilde{v} \cdot \nabla \tilde{v}) + G_{\tilde{v}} \\ - Y_{\tilde{v}} + S_{\tilde{v}}] dV \end{aligned} \quad (33)$$

Donde

$\rho$ : Densidad del fluido ( $kg/m^3$ )

$\tilde{v}$ : difusividad turbulenta modificada ( $m^2/s$ )

$V$ : volumen de celda ( $m^3$ )

$v$ : velocidad del fluido ( $m/s$ )

$v_g$ : velocidad del mallado ( $m/s$ )

$a$ : vector de área ( $m^2$ )

$\mu$ : viscosidad dinámica ( $kg/m \cdot s$ )

$G_{\tilde{v}}$ : Producción de energía turbulenta ( $J/m^3 \cdot s$ )

$Y_{\tilde{v}}$ : Disipación de energía turbulenta ( $J/m^3 \cdot s$ )

$S_{\tilde{v}}$ : Término fuente ( $J/m^3 \cdot s$ )

#### - Reynolds Stress equation

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho R dV + \int_A \rho R (v - v_g) da \\ = \int_A D da + \int_V [P + G - \frac{2}{3} \rho I Y_M + \underline{\phi} + \underline{\varepsilon} + S_R] dV \end{aligned} \quad (34)$$



Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$ : Volumen de celda ( $\text{m}^3$ )

$v$ : Velocidad del fluido ( $\text{m/s}$ )

$v_g$ : Velocidad del mallado ( $\text{m/s}$ )

$a$ : Vector de área ( $\text{m}^2$ )

$R$ : Cinemática de la tensión de Reynolds ( $\text{J/kg}\cdot\text{s}$ )

$D$ : Término de difusión ( $\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ )

$P$ : Producción de energía del flujo principal ( $\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ )

$G$ : Producción de flotabilidad ( $\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ )

$\underline{\varepsilon}$ : Disipación de energía por turbulenta ( $\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ )

$\Upsilon_M$ : Término de disipación de dilatación ( $\text{J/kg}\cdot\text{s}$ )

$\underline{\phi}$ : Tensión de presión ( $\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ )

$I$ : Intensidad de turbulencia (-)

$S_R$ : Término fuente ( $\text{J/m}^3\cdot\text{s}$ )

## 9. Bibliografía

Fuentes Figuras:

- [1] **Difusor con aletas de un Mercedes CLA. Recuperado: 14 junio 2018 desde:**  
[<http://www.carbon-addiction.com/index.php/product-category/mercedes-be-nz/page/3/?orderby=price-desc>]
- [2] **Difusor sin aletas de un Ferrari F40. Recuperado: 14 junio 2018 desde:**  
[<https://www.premierfinancialservices.com/news-events/model-masterpiece-ferrari-f40/>]
- [3] **Diferentes diseños de difusores en la F1. Recuperado: 14 junio 2018 desde:**  
[<http://www.netambulo.com/que-son-los-difusores-de-un-formula-1-y-el-kers/>]
- [4] **Doble difusor de Brawn GP. Recuperado: 14 junio 2018 desde:**  
[<https://f1around.wordpress.com/2009/04/15/difusores-grafico-comparativo-do-fluxo-de-ar/>]



- [5] **Efecto drag del alerón en un Formula 1. Recuperado: 14 junio 2018 desde:**  
[<https://www.formulaf1.es/7983/el-nuevo-f-duct-de-mclaren/>]
- [6] **Sistema de activación del DRS. Recuperado: 14 junio 2018 desde:**  
[<https://albrodpulf1.wordpress.com/2017/09/25/analisis-tecnico-drs-drag-reduction-system/>]
- [7] **Fuerzas que actúan en el coche. Recuperado: 15 junio 2018 desde:**  
[<https://motorgiga.com/renault/8/fotos/foto-audi-r8-tdi-lemans-perfil-2008-audi-coches-historicos/269628>]
- [8] **Adhesión de la primera capa de aire. Recuperado: 16 junio 2018 desde:**  
[<https://mentirastecnologicas.wordpress.com/2014/08/30/mentira-16-conseguir-un-coche-que-consuma-poco-a-120-kmh-es-facil-basta-montar-una-relacion-de-cambio-mas-larga-para-bajar-las-revoluciones-del-motor/>]
- [9] **Distribución de velocidades según el tipo de capa límite. Recuperado: 17 junio 2018 desde:**  
[<http://reconstruccionaccidentestrafico.com/ca/turbulencias-y-rebufo-accidente-de-trafico-sin-colision/>]
- [10] **Representación de la distribución de velocidades según su región de subcapa. Recuperado: 17 junio 2018 desde:**  
[[https://en.wikipedia.org/wiki/Law\\_of\\_the\\_wall](https://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_the_wall)]
- [11] **Desprendimiento de la capa límite. Recuperado: 17 junio 2018 desde:**  
[<https://www.geekmag.es/ciencia/por-que-tienen-hoyuelos-las-bolas-de-golf/>]
- [12] **Conducto basado en la ecuación de Bernoulli y el efecto Venturi. Recuperado: 17 junio 2018 desde:**  
[[https://en.wikiversity.org/wiki/Fluid\\_dynamics](https://en.wikiversity.org/wiki/Fluid_dynamics)]
- [13] **Parte trasera Audi R8. Recuperado: 16 junio 2018 desde:**  
[<http://carwallpaperszhd.tk/2008-audi-r8.html>]
- [14] **Parte frontal Audi R8. Recuperado: 16 junio 2018 desde:**  
[<https://www.autobytel.com/auto-news/features/car-spy-shots/photo-gallery-2008-audi-r8-coupe-quattro-4157/>]
- [15] **Dimensiones reales del modelo a estudiar. Recuperado: 15 junio 2018 desde:**  
[<http://www.carbodydesign.com/gallery/2007/01/22-audi-r8-design/4/>]

- [16] **Vista de los bajos del modelo. Recuperado: 15 junio 2018 desde:**  
[<https://www.audi-technology-portal.de/en/body/aerodynamics-aeroacoustics/underbody>]
- [17] **Ejemplo de malla estructurada. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node162.htm>]
- [18] **Ejemplo de malla no estructurada. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node162.htm>]
- [19] **Ejemplo de malla híbrida. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node162.htm>]
- [20] **Surface wrapper. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP%2FGUID-99488139-73FE-4A00-A610-CCDF0CE8D85B%3Den%3D.html%23>]
- [21] **Surface remesher. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-FD2C5268-3D19-4A14-B5A5-87CC586814D2=en.html>]
- [22] **Advancing layer mesher. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-622D9736-948E-4E8B-B5BA-95AE1644D8B0=en.html#wwID0EFBQ1>]
- [23] **Trimmed mesher. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-DB165A77-56AD-4854-A970-C84BF90B68AD=en.html#wwID0E2HE1>]
- [24] **Mallado tetraédrico. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**  
[<file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-CCEA0447-A345-4B80-AA49-814415B64034=en.html#wwID0EMDE1>]
- [25] **Mallado poliédrico. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**

[file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-812361C5-EEF9-4028-8A9C-EF5F730917B6=en.html#wwID0EJBD1]

- [26] Geometría estudiada por el artículo de referencia. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**

[https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison]

- [27] Comparación de los residuos. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**

[https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison]

- [28] Comparación de los resultados. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**

[https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison]

- [29] Comparación del número de celdas. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**

[https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison]

- [30] Comparación del tiempo. Recuperado: 22 junio 2018 desde:**

[https://www.symscape.com/polyhedral-tetrahedral-hexahedral-mesh-comparison]

- [31] Diferencia entre una adecuada cara y una que no. Recuperado: 20 junio 2018 desde:**

[file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-733A3104-A053-47A1-AD86-8B16F4E4757B=en.html#wwID0EADX2]

- [32] Diferencia entre un adecuado salto volumétrico y otro que no. Recuperado: 20 junio 2018 desde:**

[file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-733A3104-A053-47A1-AD86-8B16F4E4757B=en.html#wwID0EADX2]

- [33] Ángulo de asimetría. Recuperado: 20 junio 2018 desde:**



[file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP/GUID-4320B690-0437-412B-A229-C6C9D8DD1F2E=en.html#wwID0ESPW2]

**[34] Fondo plano con elevación en el eje central. Recuperado: 27 junio 2018 desde:**  
[<https://www.formulaf1.es/36459/comprendiendo-un-f1-parte-7/>]

### 9.1. Aerodinámica

**Aerodinámica del automóvil. Recuperado 5 abril 2018, desde:**  
[[https://www.youtube.com/watch?v=xgW3zp83IJA&index=16&list=PLt9jHUIYnkbHEB9PkiS5y7VWOxn\\_isNr6&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=xgW3zp83IJA&index=16&list=PLt9jHUIYnkbHEB9PkiS5y7VWOxn_isNr6&t=0s)]

**Tesis Aerodynamic development of the seguracing f1-r01 prototype using cfd. Recuperado 27 junio 2018, desde:**  
[<http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/PROJETOS%201%20SEM-15/TURMA%20A/GRUPO-3-Arrasto-GM-Cruize/04%20-%20Bibliografia%20Projeto/Aerodynamic%20Development%20with%20CFD.pdf>]

### 9.2. SolidWorks

**Solidworks Tutorial # 14 BMW M6 with Solidworks part 01 /23. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=yFEYM\\_iOfkA&index=8&list=PLt9jHUIYnkbHEB9PkiS5y7VWOxn\\_isNr6&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=yFEYM_iOfkA&index=8&list=PLt9jHUIYnkbHEB9PkiS5y7VWOxn_isNr6&t=0s)]

**SolidWorks Tutorial #243 : Mouse (advanced surfacing). Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=HITXEHjqWRI&index=19&list=PLt9jHUIYnkbHEB9PkiS5y7VWOxn\\_isNr6&t=2560s](https://www.youtube.com/watch?v=HITXEHjqWRI&index=19&list=PLt9jHUIYnkbHEB9PkiS5y7VWOxn_isNr6&t=2560s)]

**SolidWorks tutorial How to Subtract a Part from another Part. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=ygVO0kXRjX8&index=8&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=5s](https://www.youtube.com/watch?v=ygVO0kXRjX8&index=8&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=5s)]

**Editar pieza dentro de ensamblaje en Solidworks 2013. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=XWMMBwnulzA&index=17&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=58s](https://www.youtube.com/watch?v=XWMMBwnulzA&index=17&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=58s)]

### 9.3. Star-CCM+

**Ayuda Star-CCM+. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[<file:///C:/Program%20Files/CD-adapco/STAR-CCM+11.02.010/doc/en/online/index.html#page/connect%2Fsplash.html>]

**Wall Y+. Recuperado 21 junio 2018, desde:**

[[https://www.cfd-online.com/Wiki/Y\\_plus\\_wall\\_distance\\_estimation](https://www.cfd-online.com/Wiki/Y_plus_wall_distance_estimation)]

**Flow Investigations with STAR CCM+. Tutorial: Fundamentals. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[<https://www.youtube.com/watch?v=Y-clr8RwnQw>]

**Star CCM+ Beginner to Pro Tutorial Part 2 [Backwards facing step]. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=AFRxFNXtGkY&index=2&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=AFRxFNXtGkY&index=2&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=0s)]

**STAR CCM+ installation for windows. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=SIDY9AseCQQ&index=3&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=SIDY9AseCQQ&index=3&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=0s)]

**STAR-CCM+: 3D-CAD Cyclone Separator p.2. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=k3pPZd62mZE&index=4&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=11s](https://www.youtube.com/watch?v=k3pPZd62mZE&index=4&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=11s)]



**Star ccm+ Beginner to Pro [Simulating a truck part 1]. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=gTvlSBIEaWQ&index=14&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=gTvlSBIEaWQ&index=14&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=0s)]

**Star CCM 2D Analysis. Recuperado 5 abril 2018, desde:**

[[https://www.youtube.com/watch?v=QhViTnWzEig&index=10&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM\\_G-pQjOAm&t=328s](https://www.youtube.com/watch?v=QhViTnWzEig&index=10&list=PLt9jHUIYnkBF6oJme6uivgFM_G-pQjOAm&t=328s)]

**Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics, Recuperado 4 julio 2018 desde:**

[[https://www.researchgate.net/publication/281546125\\_Mesh\\_Optimization\\_for\\_Ground\\_Vehicle\\_Aerodynamics](https://www.researchgate.net/publication/281546125_Mesh_Optimization_for_Ground_Vehicle_Aerodynamics)]